

# Das Elektrofahrzeug als flexibler Verbraucher und Energiespeicher im Smart Home

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften

(Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Wirtschaftswissenschaften  
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Marc Mültin

---

Tag der mündlichen Prüfung: 18.07.2014  
Referent: Prof. Dr. Hartmut Schmeck  
Korreferent: Prof. Dr. Hansjörg Fromm

2014 Karlsruhe



Im Zuge der Nachhaltigkeit eines zukünftigen Individualverkehrs sowie der Verfolgung diverser wirtschafts- und energiepolitischer Ziele wird die Elektromobilität sowohl von der Bundesregierung als auch international derzeit intensiv gefördert. Unter den energiepolitischen Zielen ist u. a. eine saubere Art der Energieerzeugung durch bspw. Photovoltaik- und Windenergieanlagen und somit eine Abkehr von nuklearen bzw. fossilen Energieträgern zu verstehen. Jedoch sind die Zeiträume der höchsten Erzeugungsrates durch solche Anlagen und der stärksten Abnahmemenge elektrischer Energie über den Tag gesehen oftmals nicht deckungsgleich. Diese wetterbedingte Volatilität induziert einen nötigen Paradigmenwechsel hinsichtlich der Nutzung des Energienetzes: weg von einem zentralistischen verbrauchsorientierten Produktionssystem, hin zu einem dezentralen erzeugungsorientierten Verbrauchssystem, bei welchem der Nutzer seinen elektrischen Energiebedarf mehr an der Verfügbarkeit regenerativ erzeugten Stroms ausrichtet. Eine dezentralisierte Infrastruktur aus Energiespeichern mit hohem Wirkungsgrad wäre eine geeignete Lösung für eine Entkopplung der Verfügbarkeit elektrischer Energie und deren Verbrauch. Eine Möglichkeit stellen mobile Energiespeicher dar, wie sie in Elektrofahrzeugen in Form von Traktionsbatterien zu finden sind. Diese Elektrofahrzeuge müssen jedoch auf geschickte Weise in das Stromnetz integriert werden, sodass viele gleichzeitig ladende E-Fahrzeuge das Netz nicht überlasten, sondern stattdessen als netzstützende und stabilisierende Speicher und Verbraucher agieren können.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher mit der Integration eines rückspeisefähigen Elektrofahrzeugs in das Energiemanagement-System eines mit kommunikationsfähigen Komponenten ausgestatteten Haushalts (Smart Home). Ziel ist es, das Elektrofahrzeug bestmöglich als flexibel steuerbaren Verbraucher und Energiespeicher zu nutzen und somit die lokale Eigenstromnutzung zu maximieren sowie Stromkosten zu senken. Basierend auf externen zeitvariablen Strompreis- sowie Lastbegrenzungssignalen, die die aktuelle Netzsituation in geeigneter Weise abbilden, Benutzervorgaben sowie technischen Restriktionen wird mittels eines evolutionären Algorithmus der Gesamtlastgang dieses Smart Home kostenbasiert optimiert.

Der Informationsaustausch zwischen E-Fahrzeug und Energiemanagement-System wird über den Kommunikationsstandard ISO/IEC 15118 realisiert, welcher erstmals die Übermittlung energierelevanter Mehrwertinformationen und somit einen flexibel steuerbaren Lade- wie auch Rückspeisevorgang ermöglicht.

Aus einem makroskopischen Blickwinkel heraus wird zusätzlich die Realisierung eines benutzerfreundlichen E-Roaming-Verfahrens, welches es dem Elektromobilisten erlaubt, unabhängig von seinem Stromliefervertrag die Batterie seines Elektrofahrzeugs anbieter- und länderübergreifend an öffentlicher Ladeinfrastruktur aufzuladen, detailliert beschrieben und analysiert.



Ich möchte an dieser Stelle jenen Menschen danken, die mich auf verschiedenste Weise bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

In erster Linie möchte ich meinem Doktorvater, Prof. Dr. Hartmut Schmeck, meinen Dank aussprechen für die akademische Freiheit bei der Suche nach einem für mich sehr spannenden Promotionsthema sowie für seine Unterstützung in jeglicher Hinsicht. Ebenso bedanke ich mich bei meinem Korreferenten, Prof. Dr. Hansjörg Fromm, für die intensive und tiefgehende Diskussion meiner Arbeit, welche mir einen zusätzlichen Blickwinkel ermöglichte und zu einer besseren Verständlichkeit dieser Dissertationsschrift beitrug.

Die unzähligen Diskussionen einzelner Aspekte meiner Arbeit mit meinen Institutskollegen waren mir eine unschätzbar große Hilfe, führten sie doch zu einigen zielführenden Erkenntnissen und Ideen. Insbesondere möchte ich mich hier bei Lukas König, Florian Allending, Pradyumn Shukla, Daniel Pathmaperuma, Kaibin Bao und Christian Gitte bedanken.

Die Erstellung einer Dissertation geht über die Jahre mit diversen Hochs und Tiefs einher. Gerade in solchen demotivierenden Momenten eines Tiefs sind Freunde und Familie wichtige Gesprächspartner, um das Ziel nicht aus den Augen zu verlieren. Daher gilt mein größter Dank meinen Eltern, meinem engsten Freundeskreis sowie meiner Freundin, die nicht nur in schwierigen Zeiten für mich da waren und mich motiviert haben, sondern auch für die nötige Entspannung und Abwechslung sorgten, um die nötige Kraft zu schöpfen, die es zur Anfertigung einer Dissertation bedarf.



<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	4
1.2 Zielsetzung . . . . .	8
1.3 Verwandte Arbeiten . . . . .	9
1.3.1 PowerUp . . . . .	10
1.3.2 INEES . . . . .	12
1.3.3 Smart V2G . . . . .	13
1.3.4 Aktivhaus B10 . . . . .	13
1.3.5 Fellbach ZEROplus . . . . .	15
1.3.6 Toyota City Low-carbon Society Verification Project . . . . .	15
1.4 Wesentliche Beiträge dieser Arbeit . . . . .	16
1.5 Gliederungsübersicht . . . . .	17
<b>2 Standardisierungsinitiativen für interoperable E-Mobilitätsladelösungen</b>	<b>19</b>
2.1 Standardisierung der Hardwareschnittstellen . . . . .	19
2.1.1 IEC 62196 . . . . .	21
2.1.2 IEC 61851 . . . . .	25
2.2 Standardisierung der Kommunikationsprotokolle . . . . .	29
2.2.1 ISO/IEC 15118 . . . . .	29
2.2.2 Open Charge Point Protocol (OCPP) . . . . .	39
2.2.3 IEC 61850 . . . . .	39
2.2.4 Die SAE Normenfamilie für intelligentes Laden . . . . .	40
<b>3 Versuchsaufbau und Evaluationsumgebung</b>	<b>41</b>
3.1 Das Energy Smart Home Lab (ESHL) . . . . .	41
3.2 Das Energiemanagement-System (EMS) des ESHL . . . . .	42
3.3 Der Konflikt zweier Eingabequellen – E-Fahrzeug und EMP . . . . .	49

3.4	Architekturbedingte Kodierungs-Einschränkungen . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Integration des E-Fahrzeugs in das Energiemanagement</b>	<b>53</b>
4.1	Makroskopische Perspektive auf das Smart Home Szenario . . . . .	53
4.2	Der lokale Observer . . . . .	57
4.3	Das Optimierungs-Teilproblem Elektrofahrzeug . . . . .	59
4.3.1	Zu kodierende Parameter und Kodierungsansätze . . . . .	59
4.3.2	Restriktionen der Ladeflexibilität . . . . .	64
4.3.3	Formale Darstellung der kodierten Parameter und Restriktionen . . . . .	67
4.3.4	Beispiel der Korrektur eines Bitvektors im Teilproblem . . . . .	71
4.3.5	Die Wahl einer geeigneten Bitvektor-Repräsentation . . . . .	74
4.3.6	Berücksichtigung der Ladecharakteristik einer Lithium-Ionen-Batterie . . . . .	76
4.4	Der lokale Controller . . . . .	79
4.5	Der ISO/IEC 15118-2 Treiber . . . . .	79
4.6	Datenobjekte im Kommunikationsfluss zwischen Elektroauto und EMS . . . . .	81
<b>5</b>	<b>Das E-Roaming Szenario</b>	<b>87</b>
5.1	Das Zertifikatskonzept gemäß ISO/IEC 15118-2 . . . . .	88
5.1.1	Anforderungen aus Sicht eines OEMs . . . . .	88
5.1.2	Anforderungen aus Sicht eines E-Mobilitätsanbieters . . . . .	89
5.1.3	Zertifikatstypen gemäß ISO/IEC 15118-2 . . . . .	90
5.1.4	Resultierende Entscheidungen als Basis für das Zertifikatskonzept . . . . .	92
5.1.5	Initialer Bereitstellungsprozess (Certificate Provisioning) . . . . .	93
5.1.6	Vereinfachtes Zertifikatsmanagement im privaten Umfeld . . . . .	96
5.2	Das Hubject-Modell – Clearingstelle und Anbieter eines E-Mobilitäts-Marktplatzes . . . . .	97
5.2.1	Das Open InterCharge Protocol (OICP) . . . . .	100
5.3	Green eMotion – Europäischer Marktplatz aus der Forschungsperspektive . . . . .	102
<b>6</b>	<b>Evaluation</b>	<b>105</b>
6.1	Zukunftsfähigkeit der ISO/IEC 15118 Norm . . . . .	105
6.1.1	Akzeptanz . . . . .	105
6.1.2	Erweiterbarkeit . . . . .	108
6.1.3	Sicherheit . . . . .	111
6.1.4	Effizienz . . . . .	117
6.1.5	Komplexität . . . . .	118
6.2	Evaluation des ausgewählten Kodierungsschemas für das Elektrofahrzeug . . . . .	121
6.2.1	Auswertung der realen Wohnphase im Herbst 2013 . . . . .	121
6.2.2	Lastgänge simulativer Wohnphasen . . . . .	124
6.2.3	Auswertung der realen Wohnphase im Frühjahr 2014 . . . . .	140
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>143</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	143
7.2	Ausblick . . . . .	145
<b>A</b>	<b>Simulationsergebnisse Wohnphase Frühjahr 2014</b>	<b>149</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>159</b>

2.1	Dokumentenstruktur des ISO/IEC 15118 Standards und entsprechende (geplante) Stadien . . . . .	30
4.1	Abbildung ISO/IEC 15118-2 Parameter auf formales Modell (erweiterte Parameter durch Unterstreichung gekennzeichnet) . . . . .	67
4.2	Abbildung eines Bitvektors der Länge vier auf Leistungswerte [kW] . . . . .	72
4.3	Modifizierte Abbildung eines 4-Bit-Strings auf negative Leistungswerte . . . . .	74
4.4	Abbildung eines 4-Bit-Strings auf Leistungswerte mittels Gray-Kodierung . . . . .	75
4.5	Abbildung eines 5-Bit-Stringvektors auf Leistungswerte mittels Gray-Kodierung . . . . .	76
4.6	Verschachtelung des Datentypen PMaxSchedule . . . . .	80
6.1	Übersicht über bereits bestehende Firmen-Aktivitäten bzgl. ISO/IEC 15118 . . . . .	107
6.2	Übersicht über die in einer V2GTP-Nachricht erlaubten Payloadtypen (nach [39]) . . . . .	108
6.3	Definition von ID, Kategorie und Name eines Dienstes (nach [39]) . . . . .	110
6.4	Vergleich der Verschlüsselungsstärken basierend auf diversen Sicherheitsniveaus [49] [21] . . . . .	116
6.5	Standzeiten am Smart Home sowie energierelevante Daten des Elektrofahrzeugs in Woche 4 der Herbstwohnphase . . . . .	124
6.6	Simulationsdurchläufe mit diversen Parameterkonstellationen . . . . .	127
6.7	Stromkosten aller simulierten Wochenlastgänge im Herbst (inkl. Strafkosten für Lastgrenzenüberschreitung) . . . . .	130
6.8	Stromkosten aller simulierten Wochenlastgänge im Herbst (keine Strafkosten für Lastgrenzenüberschreitung) . . . . .	130
6.9	Standzeiten am Smart Home sowie energierelevante Daten des Elektrofahrzeugs in Woche 2 der Frühjahrswohnphase . . . . .	140
6.10	Stromkosten aller simulierten Wochenlastgänge im Frühjahr (inkl. Strafkosten für Lastgrenzenüberschreitung) . . . . .	141
6.11	Stromkosten aller simulierten Wochenlastgänge im Frühjahr (keine Strafkosten für Lastgrenzenüberschreitung) . . . . .	141



## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1.1	Zielkurve der Marktentwicklung für Elektrofahrzeuge bezogen auf die Jahre 2010 bis 2020 [52] . . . . .	3
1.2	Schematische Darstellung der Förderung durch die Bundesregierung (angelehnt an [24]) . . . . .	4
1.3	Beitrag und Ziele der erneuerbaren Energien bezogen auf den Brutto-Inlandsstromverbrauch Deutschlands (Quelle: BDEW, Stand 12/2013) . . . . .	5
1.4	Brutto-Stromerzeugung 2013 in Deutschland (ca. 629 Mrd. kWh), aufgeteilt nach Energieträgern (Quelle: BDEW, AG Energiebilanzen Stand: 12/2013) . . . . .	6
1.5	Systemarchitektur der Kommunikation zwischen E-Fahrzeug und Smart Grid im Projekt PowerUp [42] . . . . .	11
1.6	Interaktion zwischen den ISO/IEC 15118 V2G und IEC 62056 DLMS/COSEM Schnittstellen während des Aufbaus einer Ladesession im Projekt PowerUp [42] . . . . .	12
1.7	Grundriss des Aktivhaus B10 [43] . . . . .	14
2.1	Gesamtbild eines Ladestecksystems bestehend aus Buchsen, Steckern und Steckdose. Hier: das Combined Charging System (CCS) für das AC- und DC-Laden (Quelle: Phoenix Contact) . . . . .	20
2.2	Überblick über den weltweiten Einsatz der normierten Ladestecksysteme für Elektromobilität. GB steht für Guobiao, chinesisch für "Nationaler Standard" (Quelle: Phoenix Contact) . . . . .	22
2.3	Fahrzeugseitige Ladebuchse nach der Combined Charging System Spezifikation (Quelle: Phoenix Contact) . . . . .	23
2.4	DC-Ladestecker nach der Combined Charging System Spezifikation (Quelle: Phoenix Contact) . . . . .	23
2.5	Ein Typ 2 Ladestecker für ein- und dreiphasiges AC-Laden (Quelle: Mennekes) . . . . .	23
2.6	Combined Charging System zum AC- und DC-Laden mit den Steckvorrichtungen Typ 1, Typ 2, Combo 1 und Combo 2 [51] . . . . .	24
2.7	Typ 2 Ladekabel für ein- und dreiphasiges AC-Laden nach Mode 2 mit integrierter ICCB (Quelle: Mennekes) . . . . .	26
2.8	Beispielhafter Ladezyklus illustriert anhand eines PWM-Signals (angelehnt an [37], Anhang A) . . . . .	27

2.9	Abbildung der Teile 2 und 3 des ISO/IEC 15118 Standards sowie der verwendeten Protokolle auf die ISO/OSI-Schichten [39] . . . . .	31
2.10	Request-Response Nachrichtenpaare im PnC-Modus und Wechselstrom-Ladeszenario	34
2.11	Session-Handling gemäß der ISO/IEC 15118-2 Spezifikation [39] . . . . .	35
3.1	Grundriss des Energy Smart Home Lab . . . . .	43
3.2	Überblick über die O/C-Architektur des Energiemanagement-Systems im Smart Home (angelehnt an [3]) . . . . .	44
3.3	Globaler Optimierungsprozess im Organic Smart Home [4] . . . . .	46
3.4	EMP-Benutzungsschnittstelle zur Eingabe des gewünschten Abfahrtszeitpunkts und der Mindestreichweite . . . . .	49
4.1	Übersicht zur Integration des Elektrofahrzeugs in das Smart Home Energiemanagement (das Ladekabel ist Abbildung 2.1 entlehnt) . . . . .	54
4.2	Kapazitäts- und Energiekennwerte zum Zeitpunkt $t_p$ : Beispiel mit negativem $E_{EV}^-(t_p)$ . . . . .	69
4.3	Kapazitäts- und Energiekennwerte zum Zeitpunkt $t_p$ : Beispiel mit positivem $E_{EV}^-(t_p)$ . . . . .	70
4.4	Übersicht über die Zeitpunkte $t_p$ , $t_m$ , $t_s$ und $t_d$ . . . . .	70
4.5	Korrekturmechanismus bei der Genotyp-Phänotyp-Abbildung im Teilproblem	73
4.6	Zusammenhang der Komponenten Ladegerät, Batterie und Batteriemanagementsystem [63] . . . . .	77
4.7	Strom- und Zellspannungsverlauf beim CC-CV-Ladeverfahren [63] . . . . .	77
4.8	Verlauf dreier Ladevorgänge mit ähnlicher Leistung in der CC-Phase und Start-SOC 59% [63] . . . . .	78
4.9	Verlauf zweier Ladevorgänge mit ähnlicher Temperatur und Start-SOC 50% [63]	78
4.10	Beispielhafter Verlauf von Eingangsstrom, -Spannung und -Leistung während eines ungesteuerten dreiphasigen Ladevorgangs mit durchschnittlich 10 kW [63]	79
4.11	Beispielhafter Kommunikationsfluss zwischen den Entitäten EVCC, SECC, Treiber, EMP sowie lokalem Observer und Controller (Teil 1/2) . . . . .	82
4.12	Beispielhafter Kommunikationsfluss zwischen den Entitäten EVCC, SECC, Treiber, EMP sowie lokalem Observer und Controller (Teil 2/2) . . . . .	83
4.13	Fallunterscheidung im lokalen Observer beim Verarbeiten von vom Treiber gesendeten <b>CarDetails</b> . . . . .	85
5.1	Überblick über die diversen Zertifikatstypen, welche im Rahmen des Plug-and-Charge Identifikationsmodus' gemäß ISO/IEC 15118-2 zum Einsatz kommen [39]	91
5.2	Prozessschritte im Zuge der Bereitstellung des Vertragszertifikats (angelehnt an [39]) . . . . .	94
5.3	Hubject Rollenmodell im E-Roaming Szenario (Quelle: Hubject.com) . . . . .	97
5.4	Hubject Rollenmodell im E-Roaming Szenario [33] . . . . .	99
5.5	Architektur des Green eMotion EV Service Market [30] . . . . .	103
5.6	Referenzarchitektur – Demonstrationsfokus [30] . . . . .	104
6.1	Header-Struktur einer V2GTP-Nachricht [39] . . . . .	108
6.2	Vorgaben für TLS-Unterstützung durch EVCC und SECC [39] . . . . .	112
6.3	Übersicht aller XML-basierten Signaturen [39] . . . . .	113

---

6.4	ECDH-Schlüsselaustausch mit kurzlebigen und statischem öffentlichem Schlüssel [39] . . . . .	115
6.5	Quantitative Übersicht über ISO/IEC 15118 Nachrichtengrößen in XML und diversen EXI-Modi [61] . . . . .	117
6.6	Zustandsautomat des SECC für das Wechselstromladen [39] . . . . .	119
6.7	Auswertung der Lastgänge einzelner Verbraucher sowie des BHKWs in der 4. Woche (Wohnphase 2013) . . . . .	122
6.8	Simulation A (Herbst, 2 Personen, ohne PV/BHKW, EV-Last gesteuert) . . .	132
6.9	Simulation B (Herbst, 2 Personen, ohne PV/BHKW, EV-Last ungesteuert) .	133
6.10	Simulation C (Herbst, 2 Personen, mit PV/BHKW, EV-Last gesteuert) . . .	134
6.11	Simulation D (Herbst, 2 Personen, mit PV/BHKW, EV-Last ungesteuert) . .	135
6.12	Simulation E (Herbst, 5 Personen, ohne PV/BHKW, EV-Last gesteuert) . . .	136
6.13	Simulation F (Herbst, 5 Personen, ohne PV/BHKW, EV-Last ungesteuert) .	137
6.14	Simulation G (Herbst, 5 Personen, mit PV/BHKW, EV-Last gesteuert) . . .	138
6.15	Simulation H (Herbst, 5 Personen, mit PV/BHKW, EV-Last ungesteuert) . .	139
6.16	Auswertung der 2. Woche der Wohnphase im Frühjahr 2014 . . . . .	142
A.1	Simulation I (Frühjahr, 2 Personen, ohne PV/BHKW, EV-Last gesteuert) . .	150
A.2	Simulation J (Frühjahr, 2 Personen, ohne PV/BHKW, EV-Last ungesteuert)	151
A.3	Simulation K (Frühjahr, 2 Personen, mit PV/BHKW, EV-Last gesteuert) . .	152
A.4	Simulation L (Frühjahr, 2 Personen, mit PV/BHKW, EV-Last ungesteuert) .	153
A.5	Simulation M (Frühjahr, 5 Personen, ohne PV/BHKW, EV-Last gesteuert) .	154
A.6	Simulation N (Frühjahr, 5 Personen, ohne PV/BHKW, EV-Last ungesteuert)	155
A.7	Simulation O (Frühjahr, 5 Personen, mit PV/BHKW, EV-Last gesteuert) . .	156
A.8	Simulation P (Frühjahr, 5 Personen, mit PV/BHKW, EV-Last ungesteuert) .	157



## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AC	Alternating Current .....	19
BHKW	Blockheizkraftwerk .....	41
BMS	Batterie-Management-System.....	37
CCS	Combined Charging System .....	22
CPO	Charge Point Operator .....	100
DC	Direct Current .....	20
E-MP	E-Mobility Provider .....	100
EA	Evolutionärer Algorithmus .....	52
EMP	Energy Management Panel .....	42
EMS	Energiemanagement-System .....	41
ESHL	Energy Smart Home Lab .....	41
EV	Electric Vehicle .....	20
EVCC	Electric Vehicle Communication Controller .....	32
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment .....	20
OCPP	Open Charge Point Protocol .....	39
OICP	Open InterCharge Protocol.....	95
PWM	Pulsweitenmodulation .....	25
SECC	Supply Equipment Communication Controller .....	32
SOC	State of Charge .....	29



Forschungsinitiativen und staatliche Förderprogramme, welche darauf abzielen, die Potentiale der Elektromobilität zu erforschen und Anreizmechanismen zur Ankurbelung des Markthochlaufs von Elektrofahrzeugen zu erzeugen, sind weltweit verstärkt zu beobachten. Die deutsche Bundesregierung verabschiedete beispielsweise im Jahre 2009 den Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität [17], welcher das Rahmenwerk für zukünftige Technologieentwicklungen darstellen soll, um einen geplanten Markthochlauf der Elektromobilität in Deutschland voranzutreiben.

Mit der Förderung der Elektromobilität verfolgt die Bundesregierung diverse umwelt- und wirtschaftspolitische Ziele, worunter bspw. die Reduzierung der Abhängigkeit von Erdölimporten fällt. Der fossile Energieträger Öl stellt schließlich eine begrenzte Ressource dar, deren Förderung zunehmend mit steigenden Rohstoffpreisen einhergeht. Im Zuge der Nachhaltigkeit eines zukünftigen Individualverkehrs verspricht man sich von der Elektromobilität auch eine erhebliche Minimierung von Emissionen, wie der klimaschädlichen Treibhausgase (CO<sub>2</sub>), des Feinstaubes und des Lärms, die allesamt durch Verbrennungsmotoren entstehen. Um ihre politischen Ambitionen an einem messbaren Meilenstein auszurichten, wurde das Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen auf deutschen Straßen bis zum Jahr 2020 ausgerufen und u. a. im Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität verankert.

Im Rahmen des Konjunkturpakets II “Pakt für Beschäftigung und Stabilität in Deutschland” der Bundesregierung wurden daher auch 500 Millionen Euro zur Förderung der F&E Entwicklungen im Bereich der Elektromobilität im Zeitraum von 2009 bis 2011 investiert. Um diese und zukünftige Fördermittel möglichst effizient einzusetzen, wurde auf Einladung der Bundesregierung am 3. Mai 2010 die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) gegründet. Diese setzt sich aus Vertretern der Industrie, Wissenschaft, Politik, Gesellschaft und Gewerkschaften zusammen. Ziel dieses Beratergremiums ist es, in sieben themenzentrierten Arbeitsgruppen Konzepte zu entwickeln, die einen marktorientierten und technologieoffenen Ansatz verfolgen, um Deutschland zum Leitanbieter und Leitmarkt für Elektromobilität bis 2020 zu entwickeln. Den sieben Arbeitsgruppen

- Antriebstechnologie,
- Batterietechnologie,
- Ladeinfrastruktur und Netzintegration,

- Normung, Standardisierung und Zertifizierung,
- Materialien und Recycling,
- Nachwuchs und Qualifizierung sowie
- Rahmenbedingungen

gehören u. a. Vertreter von vier Ministerien an, die unter dem Dach der Bundesregierung die Elektromobilität mit unterschiedlichen Etats und Projekten fördern. Hierzu zählen die Bundesministerien für Umwelt- und -bau (BMUB)<sup>1</sup>, für Verkehr und digitale Infrastrukturen (BMVI)<sup>2</sup>, für Bildung und Forschung (BMBF) sowie für Wirtschaft und Energie (BMWi)<sup>3</sup>, welche sich über die Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) als zentralen Ansprechpartner gegenseitig austauschen.

In ihrem dritten Fortschrittsbericht vom Juni 2012 erläutert die NPE das Markthochlauf-szenario für Elektrofahrzeuge für die Jahre 2010 bis 2020, welches Abbildung 1.1 zu entnehmen ist. Unter die Kategorie “Elektrofahrzeug” fallen aus Sicht der NPE sowohl reine batteriebetriebene E-Fahrzeuge (BEVs) als auch Hybridfahrzeuge, worunter sich neben Plug-in Hybriden (PHEVs) auch sogenannte Range-Extender subsumieren. Laut den Zahlen des Kraftfahrtbundesamtes (KBA)<sup>4</sup> sind zum Stichtag 1. Januar 2014 genau 12.156 rein batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (Pkw) in Deutschland zugelassen. Die genaue Summe der Plug-in Hybride ist schwer zu erfassen, da das KBA sie in seiner Statistik erst seit dem Jahr 2013 separat von übrigen Hybridfahrzeugen (insgesamt 85.575 zum 1.1.2014) ausweist. Allein im Jahr 2013 wurden jedoch deutschlandweit bereits 1.385 Plug-in Hybride neu zugelassen. Die zusammen genommen 97.731 Elektrofahrzeuge zum 1.1.2014 sind somit fast deckungsgleich mit der antizipierten Hockeykurve aus Abbildung 1.1. Die nächsten drei Jahre des Markthochlaufs stellen mit dem steilen Anstieg der Kurve den wesentlich schwierigeren Teil dar, welcher ein wichtiger Indikator dafür sein wird, ob das Millionenziel bis 2020 wirklich erreicht werden kann.

Im Rahmen der NPE wurden ebenso sogenannte thematische Leuchttürme bestimmt, die durch die vier Ministerien gefördert werden. Ein Beispiel für einen solchen Leuchtturm ist der Förderbereich “IKT für Elektromobilität”, welcher durch das BMWi gefördert wird. Darüber hinaus fördern die vier Ministerien gemeinsam auf Empfehlung der NPE vier ausgewählte “Schaufenster” für Elektromobilität. Diese Schaufenster sind regionale Demonstrations- und Pilotvorhaben, welche öffentlichkeitswirksam Innovationen im Bereich der Elektromobilität entwickeln und erlebbar machen sollen. Eine Übersicht über die Projekte des baden-württembergischen Schaufensters “LivingLab BW<sup>e</sup> mobil” liefert die Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg GmbH [43]. Einen weiteren Baustein der Forschungspolitik des Bundes hinsichtlich Elektromobilität stellt das Spitzencluster Elektromobilität Südwest<sup>5</sup> dar, welches den Fokus auf die Themen Markt und Kosten, Handhabung und Komfort sowie vernetzte Mobilität setzt.

---

<sup>1</sup>Mit Ernennung des Kabinetts Merkel III am 17. Dezember 2013 wurde das Bundesumweltministerium (BMU) in das Bundesumwelt- und -bauministerium (BMUB) umbenannt.

<sup>2</sup>Vor Ernennung des Kabinetts III als Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) bekannt.

<sup>3</sup>Vor Ernennung des Kabinetts III als Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) bekannt.

<sup>4</sup>Eine übersichtlich aufbereitete Statistik des Branchendienstes [electrive.net](http://www.electrive.net) [22] liefert ebenso eine gute Übersicht über die Zulassungszahlen.

<sup>5</sup><http://www.e-mobilbw.de/de/aufgaben/cluster-elektromobilitaet-sued-west.html>

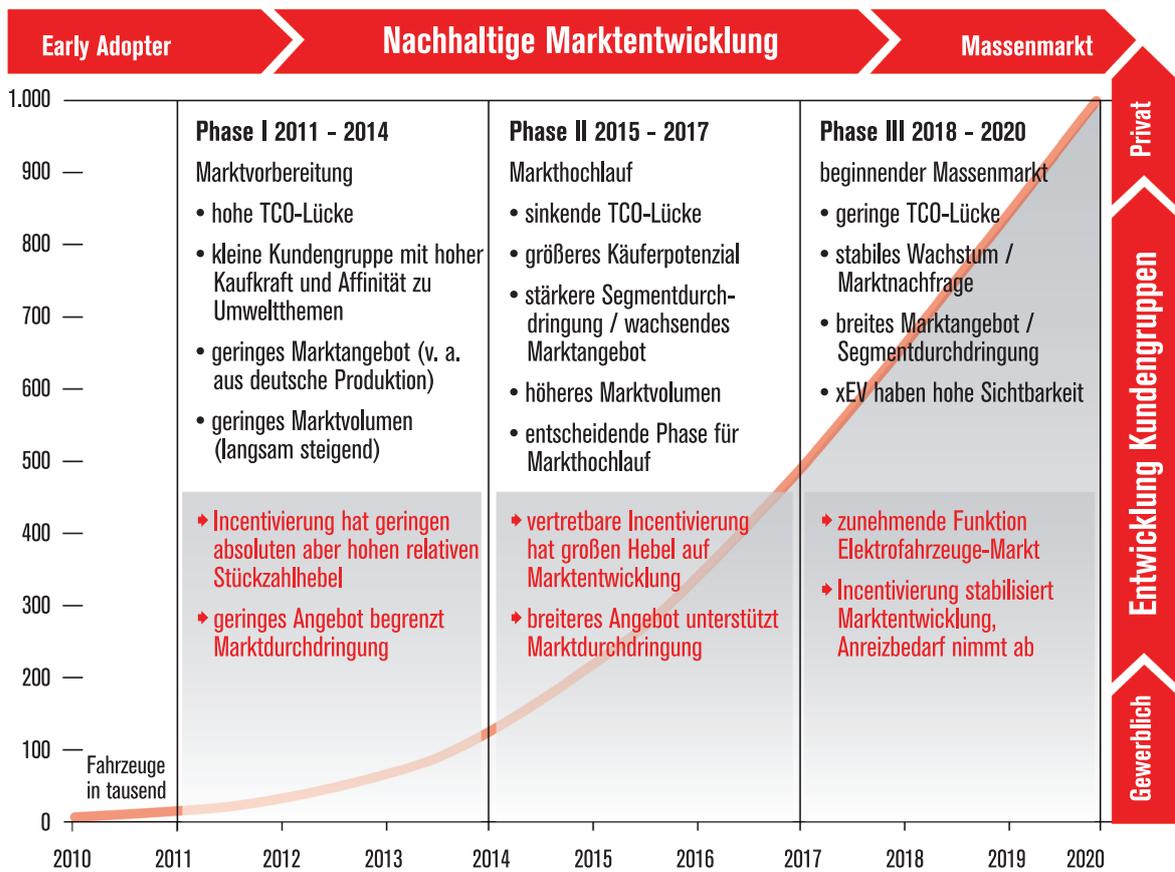


Abbildung 1.1: Zielkurve der Marktentwicklung für Elektrofahrzeuge bezogen auf die Jahre 2010 bis 2020 [52]

Es ist also deutlich erkennbar, welch hohen Stellenwert die Förderung der Elektromobilität mit ihren verschiedensten Themenbereichen in Deutschland hat. Abbildung 1.2 fasst die Förderstruktur unter dem Dach der Bundesregierung in einer schematischen Darstellung zusammen. Die als weiße Balken dargestellten Leuchtturm-Elemente sollen die Erweiterbarkeit dieses Themenspektrums repräsentieren.

Im Zuge der vom BMWi geleiteten Förderinitiative “IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic” wurde das Forschungsprojekt *iZEUS – intelligent Zero Emission Urban System*<sup>6</sup> ins Leben gerufen, dessen Ergebnisse auch im Rahmen des Schaufensters “Living Lab BW E-Mobil” des Landes Baden-Württemberg präsentiert werden. Der folgende Abschnitt 1.1 wird die Forschungsziele des Projekts aufgreifen und die Notwendigkeit der informationstechnischen Einbindung von Elektrofahrzeugen in das Energieversorgungssystem vor dem Hintergrund der in Deutschland eingeläuteten Energiewende motivieren. Diese Motivation bildet die einführende Grundlage für die Forschungstätigkeit und resultierenden Ergebnisse, welche in dieser Arbeit präsentiert werden.

<sup>6</sup><http://izeus.kit.edu>

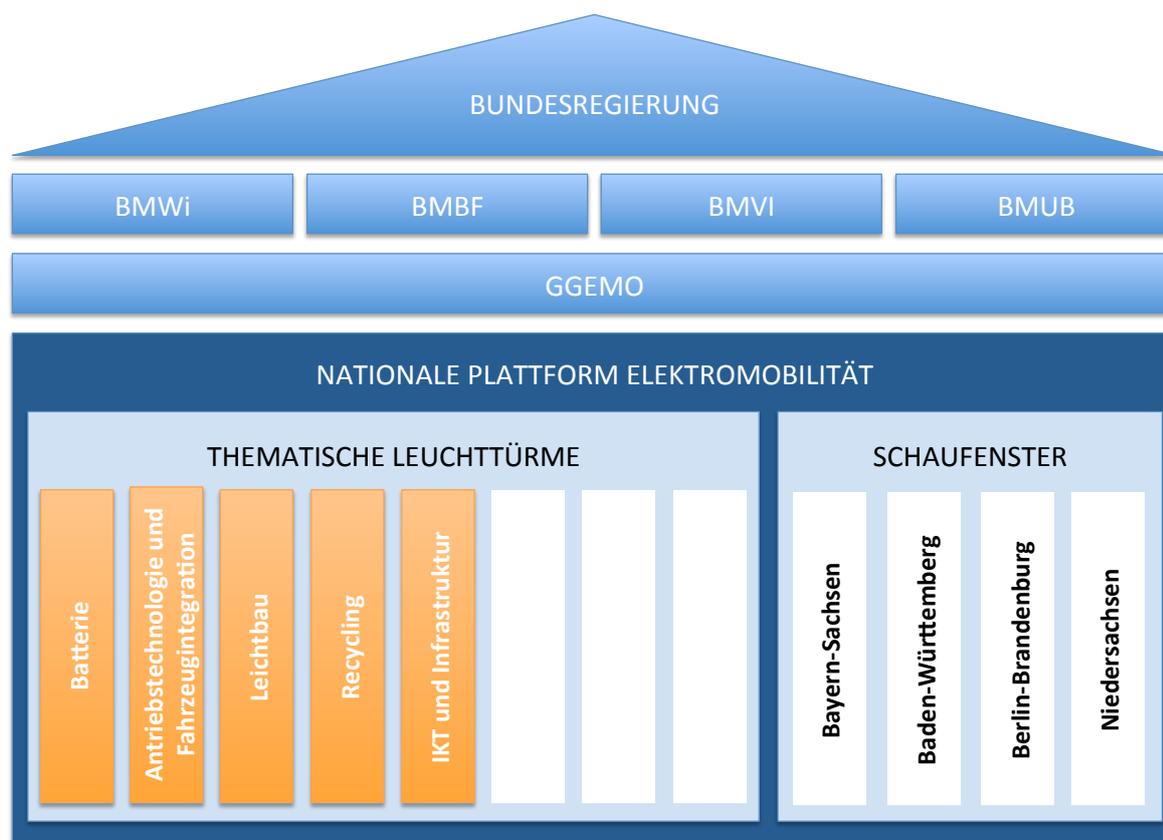


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung der Förderung durch die Bundesregierung (angelehnt an [24])

## 1.1 Motivation

Das deutsche Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) aus dem Jahre 2000 läutete eine Revolution in Deutschlands Energiesektor ein, speziell dem deutschen Stromnetz, welches sich über Jahrzehnte bereits zu einer zentralistischen Struktur mit Stromerzeugung aus vorwiegend großen fossilen und nuklearen Kraftwerken entwickelt hatte. Der Fokus der elektrischen Energieerzeugung verschiebt sich seither hin zu einer steten Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien (EE) am deutschen Strommix. Zusammen mit der gesetzlich festgelegten Förderung für eine Stromerzeugung aus Wind- und Solarkraftanlagen wirkten diese Maßnahmen bisher als wichtige Geburtshelfer für die deutsche Energiewende.

Der Erfolg der deutschen Energiewende hängt jedoch auch von den energiepolitischen Zielen der europäischen Nachbarn ab, schon allein aufgrund der engmaschigen Stromnetze auf dem europäischen Kontinent. Vor dem Hintergrund der Versorgungssicherheit, Bezahlbarkeit und Netzstabilität verpflichteten sich die EU-Mitgliedstaaten im Rahmen der Erneuerbare-Energien-Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009, bis 2020

- die Treibhausgasemissionen um mindestens 20 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren,
- eine Energieeffizienzsteigerung um 20 Prozent anzustreben, sowie

- einen Anteil von 20 Prozent erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch zu erreichen,

was gemeinhin unter dem Begriff “20-20-20”-Ziele zusammengefasst wird. Im Rahmen einer langfristigen Klimaschutzpolitik der EU hat das Europäische Parlament seine Zielausrichtung erneuert und sich in einer Sitzung am 05.02.2014 dafür ausgesprochen, bis 2030 den Anteil der Treibhausgasemissionen um 40% zu senken, den Ausbau der erneuerbaren Energiequellen auf 30% zu heben und eine Verbesserung der Energieeffizienz um 40% zu erreichen [26].

Die Bundesregierung definiert darüber hinaus eigenständige Ziele für Energieeffizienz sowie für den Anteil erneuerbarer Energien, wie Abbildung 1.3 zu entnehmen ist<sup>7</sup>. Darüber hinaus hat Deutschland als Konsequenz aus der Reaktorkatastrophe in Fukushima im Jahre 2011 in seinem Atomausstiegsgesetz beschlossen, sämtliche Kernkraftwerke Deutschlands bis zum Jahr 2022 in einem mehrstufigen Prozess stillzulegen und vom Netz zu nehmen.

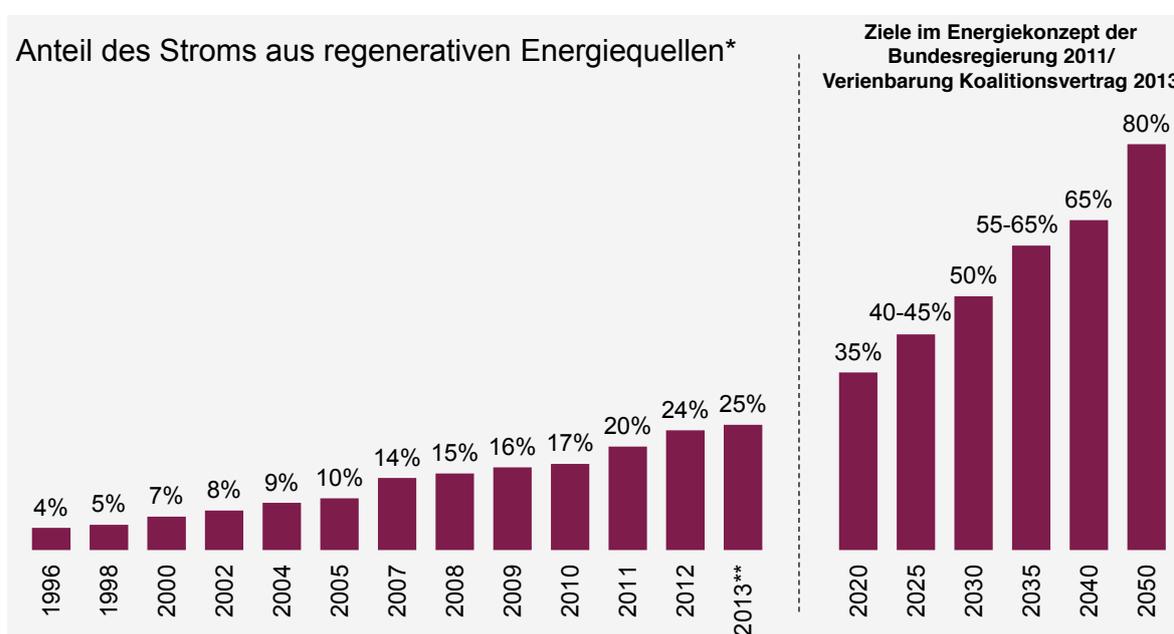


Abbildung 1.3: Beitrag und Ziele der erneuerbaren Energien bezogen auf den Brutto-Inlandsstromverbrauch Deutschlands (Quelle: BDEW, Stand 12/2013)

Aus Abbildung 1.4 geht klar hervor, dass die volatilen, wetterabhängigen Energieträger Wind- und Solarenergie mit einem Anteil von über 50% an der Gesamterzeugung aus erneuerbaren Energien die Grundpfeiler der zukünftigen Energieversorgung darstellen. Mit Hilfe dieser Energieformen kann sehr günstig Strom erzeugt werden, da lediglich Investitionskosten für die initiale Fertigung sowie Installation der Anlagen als auch relativ geringe Wartungskosten anfallen. Keine Kosten müssen für die jeweiligen Rohstoffe aufgewendet werden, da Wind und Sonne naturgegeben kostenfrei zur Verfügung stehen – im Gegensatz zu den stetig steigenden Kosten für nukleare und fossile Rohstoffe. Diese saubere Art der Energieerzeugung bringt es jedoch mit sich, dass die Verfügbarkeit der elektrischen Energie zunehmend vom Wetter abhängig ist.

Die Zeiträume der höchsten Erzeugungsrate durch EE-Anlagen und der stärksten Abnahmemenge elektrischer Energie sind über den Tag gesehen daher oftmals nicht deckungsgleich.

<sup>7</sup>Die Angaben für 2013 stellen einen geschätzten Wert dar.

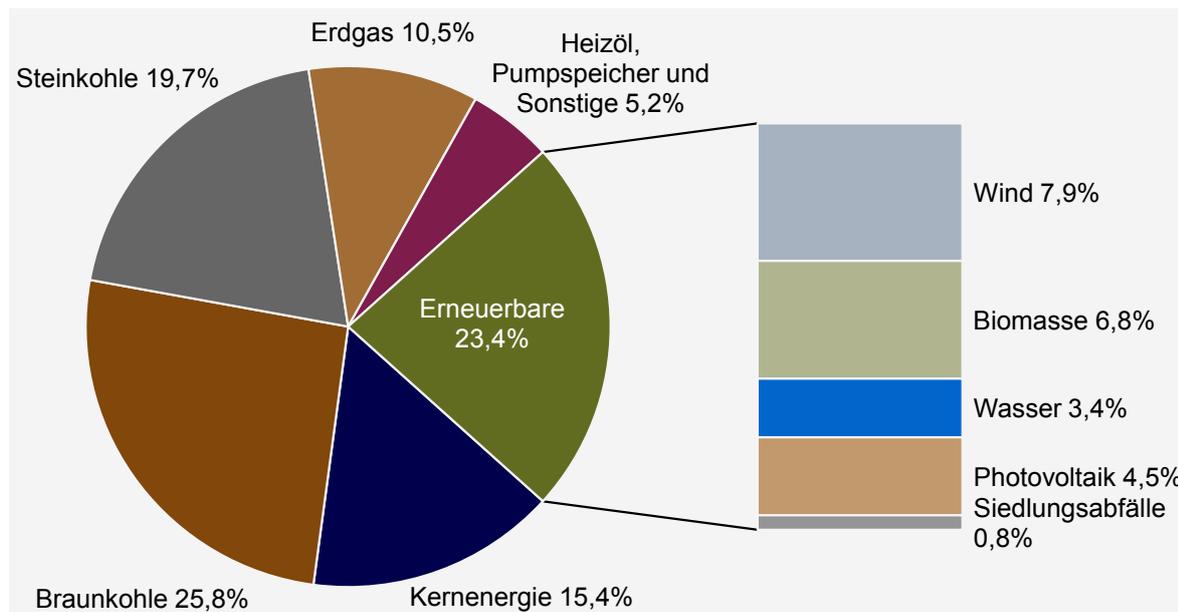


Abbildung 1.4: Brutto-Stromerzeugung 2013 in Deutschland (ca. 629 Mrd. kWh), aufgeteilt nach Energieträgern (Quelle: BDEW, AG Energiebilanzen Stand: 12/2013)

Diese Volatilität induziert einen nötigen Paradigmenwechsel hinsichtlich der Nutzung des Energienetzes: weg von einem zentralistischen verbrauchsorientierten Produktionssystem, hin zu einem dezentralen erzeugungsorientierten Verbrauchssystem, bei welchem der Nutzer seinen elektrischen Energiebedarf mehr an der Verfügbarkeit regenerativ erzeugten Stroms ausrichtet, was eine hohe Flexibilität beim Verbraucher erfordert.

Daher ist eine kosteneffektive und energieeffiziente Evolution des Übertragungs- und Verteilnetzes hin zu einem System notwendig, in welchem Energieerzeugungseinheiten, Energiespeicher, private wie auch industrielle Verbraucher sowie Netzbetriebsmittel intelligent miteinander verknüpft sind und untereinander kommunizieren können, basierend auf Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) und Automatisierungsmechanismen. Ein solches System wird weitgehend als "Smart Grid" (intelligentes Energienetz) bezeichnet [51].

Eine dezentralisierte Infrastruktur aus Energiespeichern mit hohem Wirkungsgrad stellt eine geeignete Lösung für eine Entkopplung der Verfügbarkeit elektrischer Energie, welche aus fluktuierenden erneuerbaren Energieträgern produziert wird, und deren Verbrauch dar. Als Gegenentwurf werden Reservekraftwerke diskutiert, welche jedoch mit zunehmendem Ausbau erneuerbarer Energien eine immer geringere Volllaststundenzahl erreichen und je nach Kraftwerk weiterhin die Zerstörung der Umwelt mit der Emission von Treibhausgasen befördern. Jene Energiespeicher können vielfältiger Natur sein, angefangen von Pumpspeicherkraftwerken und Kraft-Wärme-Kopplungs-Einheiten (BHKWs) hin zu stationären Batterien, wobei all diese Alternativen ihre Vor- und Nachteile mit sich bringen. Eine weitere Möglichkeit stellen mobile Energiespeicher dar, wie sie in Elektrofahrzeugen in Form von Traktionsbatterien<sup>8</sup> zu finden sind.

Diese Elektrofahrzeuge müssen jedoch auf geschickte Weise in das Stromnetz integriert

<sup>8</sup>Wenn im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Rede von der Batterie des Elektrofahrzeuges ist, dann ist hiermit stets die Hochvolt-Batterie (auch Traktionsbatterie genannt) gemeint, im Gegensatz zur 12 V Batterie, welche üblicherweise die Bordelektronik versorgt und mit einer viel geringeren Kapazität ausgestattet ist.

werden, sodass ein hoher Gleichzeitigkeitsfaktor der Ladevorgänge das Netz nicht im Übermaß belastet. Im Gegensatz hierzu können die in den Elektrofahrzeugen verbauten mobilen Speicher als netzstützende und stabilisierende Komponente agieren und somit wichtige Bestandteile eines auszubauenden Smart Grids darstellen. Die Aufgabe der Netzstabilisierung, welche bisher klassisch auf der Übertragungsnetzebene angesiedelt gewesen ist, verlagert sich somit zunehmend auch auf die Ebene der Verteilnetze, an die die Elektrofahrzeuge angeschlossen sind. Neben der Schlüsselrolle als Treiber der Nachhaltigkeit des zukünftigen Individualverkehrs können die Elektrofahrzeuge somit auch zur effektiven Ausnutzung der Netze beitragen, sofern Energieversorger, Netzbetreiber und Elektrofahrzeuge ein gemeinsames Kommunikationssystem nutzen. Elektrofahrzeuge können überschüssige Energie aus fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen speichern und – falls mit einem Wechselrichter ausgestattet – diese Energie wieder in das Netz einspeisen, sobald diese wieder benötigt wird. Damit ein Elektrofahrzeug auch als steuerbare Last und dezentraler Energiespeicher im Verteilnetz eingesetzt werden kann, ohne den Fahrkomfort bezüglich der Reichweite negativ zu beeinträchtigen, ist die Erschließung der Flexibilität des Ladebedarfs eine grundlegende Voraussetzung für einen funktionierenden Paradigmenwechsel zu “Verbrauch folgt der Erzeugung”.

Die folgenden drei Integrationsszenarien, welche in ähnlicher Form bereits in [46] vorgestellt wurden, beschreiben das hohe Potential einer vorteilhaften kommunikationstechnischen Einbindung von Elektrofahrzeugen in das Smart Grid:

### **Integrationsszenario 1: Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch**

Entkopplung der Verfügbarkeit von überschüssiger, volatil erzeugter erneuerbarer Energie von ihrem Verbrauch, indem durch Nutzung der in E-Fahrzeugen<sup>9</sup> verbauten Batterien die Energie erst gespeichert und in Spitzenlastzeiten wieder in das Netz rückgespeist wird. Das Ziel ist eine minimale Abweichung von einem gewünschten Lastprofil und somit eine Lastverschiebung in energetisch vorteilhaftere Zeiten.

Zudem kann durch die Integration eines E-Fahrzeugs in ein Energiemanagement-System eines privaten Haushalts bei einem automatisiert gesteuerten Ladevorgang sowohl der Eigenverbrauch als auch der Kapitalwert einer auf dem heimischen Dach installierten PV-Anlage deutlich gesteigert werden, wie bspw. durch Kaschub et al. [40] gezeigt wurde. Die stetig sinkende Vergütung für die Netzeinspeisung von PV-Strom aufgrund fallender Investitionskosten führt dazu, dass sich der Eigenverbrauch sogar rentabler gestaltet.

### **Integrationsszenario 2: Unterbrechungsfreie Stromversorgung**

Nutzung des Elektrofahrzeugs als unterbrechungsfreie Stromversorgung im Falle eines Stromausfalls. Das Fahrzeug könnte das Haus im Notfall mit elektrischer Energie aus seiner Batterie versorgen, bis das Haus wieder netzseitig mit Strom versorgt wird. Dies ist ein Anwendungsfall, welcher bspw. in Japan bereits viel Anklang findet. Aus diesem Grund hat der japanische Fahrzeughersteller Mitsubishi eine sogenannte “Power BOX” entwickelt, welche als Adapter fungiert, über den man das Mitsubishi Electric Vehicle (ehemals i-MiEV) mit einem Hausanschluss verbindet, um so eine Leistung von 1500 W bereitzustellen [44]. Das Electric Vehicle kann laut Aussage Mitsubishis mit seinen 16 kWh einen Haushalt somit bis zu sechs Stunden mit elektrischer Energie versorgen. Es stehen somit maximal 9 kWh an Energie für die Rückspeisung zur Verfügung, um stets eine gewisse Mindestreichweite garantieren zu können.

<sup>9</sup>Fortan werden die Begriffe Elektrofahrzeug, Elektroauto und E-Fahrzeug synonym für einen rein batteriebetriebenen Pkw verwendet.

### Integrationszenario 3: Netzdienstleistungen

In einem dritten konkreten Anwendungsfall könnte das Elektrofahrzeug für Netzdienstleistungen genutzt werden, um einer Über- bzw. Unterspannung im Niederspannungsnetz zu begegnen. Eine Unterspannung tritt bei einem hohen Verbrauch und langen Leitungen auf, wohingegen eine Überspannung oft in Zusammenhang mit einer vergleichsweise hohen Netzeinspeisung durch Photovoltaikanlagen auftritt, wie es bspw. oft im ländlichen Raum zu beobachten ist. So könnte einerseits, ähnlich zu Integrationszenario 1, im Falle einer Überspannung dezentral erzeugter Strom aus PV-Anlagen vor Ort verbraucht bzw. im Falle einer Unterspannung elektrische Energie verbrauchsnahe bereitgestellt werden. Eine technische Evaluierung dieses Potentials sowie Annahmen zu möglichen jährlichen Einnahmen aus solchen Systemdienstleistungen wurde bspw. in Rolink et al. [57] vorgenommen.

Andererseits könnte bspw. Blindleistung auf Anfrage des Netzbetreibers bereitgestellt oder kompensiert werden. Blindleistung entsteht aufgrund physikalischer Effekte durch eine Phasenverschiebung in Wechselstromnetzen und beeinflusst die Spannung im Netz. Im Gegensatz zur Wirkleistung ist die Blindleistung nicht nutzbar und kann auch nicht vergütet werden. Befindet sich ein Abschnitt des Stromnetzes in einem ungünstigen Spannungsband, so kann der Netzbetreiber mit einem bestimmten Verschiebungsfaktor (ein Zahlenwert zwischen 0 und 1) den gewünschten Anteil der Blindleistung kommunizieren, welchen letzten Endes das Elektrofahrzeug durch seinen bi-direktionalen Umrichter bereitstellen könnte.

Speziell dem ersten Integrationszenario widmet sich u. a. das Forschungsprojekt iZEUS, in dessen Rahmen diese Arbeit entstanden ist. Nachdem die Hintergründe einer vorteilhaften Integration von Elektrofahrzeugen in das Energienetz motiviert wurden, werden nun im Folgenden die zentralen Zielsetzungen der vorliegenden Arbeit vorgestellt.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, ein rückspeisefähiges Elektroauto in das Energiemanagement-System eines Hauses zu integrieren, welches aufgrund seiner kommunikationstechnischen Ausstattung und der installierten Verbraucher und Erzeuger, die stets ihren Zustand mitteilen können, als Smart Home bezeichnet wird. Im Rahmen der Forschungsprojekte MeRegioMobil<sup>10</sup> und iZEUS wurde ein solches Smart Home aufgebaut und stetig erweitert. In diesem Zuge wurde ein Energiemanagement-System (EMS) konzipiert und eingesetzt, welches sämtliche thermischen und elektrischen Komponenten beobachtet und steuert. Kapitel 3 wird auf die Versuchsumgebung noch genauer eingehen, weiterführende Details hierzu sind [3] zu entnehmen.

Zur Realisierung einer kommunikationstechnischen Einbindung eines Elektrofahrzeugs in das Energienetz, speziell am Beispiel eines Smart Home, bedarf es jedoch Kommunikationsprotokolle, die in der Lage sind, energierelevante Mehrwertinformationen auszutauschen und zu verarbeiten. Um das Integrationszenario so realistisch wie möglich zu gestalten und die Möglichkeit zu bieten, die gewonnenen Erkenntnisse im Zuge eines wissenschaftlichen Transfers auch in zukünftige Produkte einfließen zu lassen, soll keine proprietäre Lösung zum Einsatz kommen. Vielmehr ist es sinnvoll, auf bereits existierende oder in der Entwicklung befindliche Standards zu setzen, welche eine breitere Akzeptanz und Verwertbarkeit der wissenschaftlichen Erkenntnisse sicherstellen. Aus diesem Grund kommt für die Kommunikation und Verarbeitung der energierelevanten Mehrwertinformationen an der Schnittstelle zwischen Elektroauto und Ladestation respektive EMS der Kommunikationsstandard ISO/IEC 15118 zum

<sup>10</sup><http://meregiomobil.forschung.kit.edu>

Einsatz. Basierend auf diesem Standard soll ein intelligentes Lademanagement konzipiert und implementiert werden. Hierbei werden sowohl Restriktionen und Randbedingungen, die das Elektrofahrzeug dem EMS mitteilt, als auch die Lastsituation im Smart Home berücksichtigt, um ein geeignetes Lastprofil für das E-Fahrzeug zu generieren. Dieses Lastprofil repräsentiert sowohl Zielvorgaben durch den Bewohner des Smart Home, dessen Entscheidungen stets oberste Priorität haben, als auch die Auswirkungen der Steuersignale, die dem Smart Home kommuniziert werden, wie bspw. ein zeitvariabler Strompreistarif oder ein zeitvariables Lastbegrenzungssignal.

Darüber hinaus soll aus einem makroskopischeren Blickwinkel heraus ein sogenanntes E-Roaming Szenario betrachtet werden. Als E-Roaming im Kontext der Elektromobilität wird die Möglichkeit verstanden, sein Elektrofahrzeug an einer beliebigen Ladestation aufladen zu können, unabhängig davon, ob ein Vertragsverhältnis mit dem Betreiber genau dieser Ladeinfrastruktur besteht. Vor diesem Hintergrund werden neben den Potentialen, die der ISO/IEC 15118 Kommunikationsstandard hierfür bietet, auch weitere Kommunikationsprotokolle wie das Open Charge Point Protocol (OCPP) sowie das Open InterCharge Protocol (OICP) beleuchtet. Diese drei Protokolle bauen auf verschiedenen Kommunikationsstufen nahtlos aufeinander auf und ermöglichen durch einen einfachen Zugang zu (semi-)öffentlicher Ladeinfrastruktur ein benutzerfreundliches Elektromobilitätserlebnis.

Ausgehend von den präsentierten Zielstellungen werden im folgenden Abschnitt bereits bestehende wissenschaftliche und technologische Ergebnisse in diesem Zusammenhang vorgestellt, bevor im letzten Abschnitt des einführenden Kapitels die wesentlichen Beiträge der vorliegenden Arbeit diesen Ansätzen gegenübergestellt werden.

### 1.3 Verwandte Arbeiten

In der Literatur finden sich zahlreiche Veröffentlichungen zu Konzepten, welche den gesteuerten Ladevorgang eines oder mehrerer Elektrofahrzeuge in einem eingegrenzten Gebiet adressieren. Ein gewichtiger Teil jener wissenschaftlicher Untersuchungen hat einen eher wirtschaftlich geprägten Fokus. So untersuchen bspw. Schuller et. al. [64] in einer Simulation das ökonomische Potential eines preisgesteuerten intelligenten Ladevorgangs sowie der Bereitstellung von Energie im Vergleich zu einem ungesteuerten Ladevorgang anhand der Großhandelspreise für Strom an der europäischen Marktplattform EEX, empirischen Fahrprofilen aus dem deutschen Mobilitätspanel<sup>11</sup> sowie drei unterschiedlichen E-Fahrzeugspezifikationen. Hierbei wird angenommen, dass nur zu Hause geladen wird. Nach Einbeziehung energie- und leistungsbezogener Abnutzungskosten kommen sie zu dem Schluss, dass die Stromkosten für Berufstätige im Durchschnitt um mehr als 32 % gesenkt werden können, für Rentner liege die Kostenersparnis gar bei mindestens 51 %.

In einer weiteren Arbeit von Schuller und Rieger [65] wurde evaluiert, welchen wirtschaftlichen Kostenvorteil auf Endkundenseite die Einbindung von Elektrofahrzeugen in den deutschen Regelenergiemarkt hat. Die Ergebnisse zeigen auf, dass die profitabelste Option die Bereitstellung negativer Regelenergie (Laden des E-Fahrzeugs) im Sekundär- wie auch im Tertiärregelenergiemarkt darstellt, mit durchschnittlich jährlichen Erträgen von 730,31 Euro pro Fahrzeug. Hierbei wurden empirische Preisdaten aus den Jahren 2011 und 2012 der vier

<sup>11</sup><http://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu>

großen Übertragungsnetzbetreiber Amprion, TransnetBW, 50Hertz Transmission und TenneT TSO mit einbezogen. Weiterhin wird angenommen, dass ein Aggregator eine ausreichend große Menge an E-Fahrzeugen steuern kann, wobei einerseits die Mobilitätsbedürfnisse der Fahrer und andererseits die Mindestanforderungen für die Teilnahme am Regelenergiemarkt (festgelegt im sogenannten Transmission Code) berücksichtigt werden.

Gottwalt et. al. [29] gehen ebenfalls von einer zentralen Aggregatorinstanz aus, um den Ladevorgang einer Flotte von E-Fahrzeugen dahingehend zu steuern, dass eine maximale Korrelation mit der Verfügbarkeit von Wind- und PV-Energie erzielt und somit die Nutzung konventioneller Kraftwerke minimiert wird. Hierbei wird erneut auf empirische Fahrdaten aus dem deutschen Mobilitätspanel zurückgegriffen, wobei speziell die Fahrprofile von Berufstätigen herangezogen werden und die Annahme besteht, dass nur zu Hause geladen wird. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass die jährliche Ausbeute der zur Verfügung stehenden Windenergie durch einen gesteuerten Ladevorgang auf ca. 67 % fast verdoppelt werden kann.

Die vorliegende Arbeit unterscheidet sich zu den meisten bisherigen Untersuchungen darin, dass der Fokus mehr auf der technischen Integration des Elektrofahrzeugs mittels teils standardisierter Informations- und Kommunikationstechnologie liegt. Um nun aus der Vielzahl der verfügbaren Publikationen einen angemessenen Vergleich zu dieser Arbeit ziehen zu können, werden im restlichen Teil dieses Abschnitts jene Arbeiten vorgestellt, welche sich auch mit einem konkreten Kommunikationsprotokoll beschäftigen und nicht – wie es oft in der Literatur anzufinden ist – ein solches bereits als gegeben voraussetzen, ohne näher auf wichtige Kommunikationsdetails einzugehen.

Betreffend autonomer Systeme wie dem in dieser Arbeit vorgestellten Smart Home EMS, welche sich mit elektrischem Energiemanagement beschäftigen, wurde bereits in Allending et al. [3] eine ausgiebige Vergleichsanalyse durchgeführt.

### 1.3.1 PowerUp

PowerUp [42] ist ein von der EU im Zuge des 7. Rahmenprogramms kofinanziertes Projekt, welches im Juli 2011 mit einer Laufzeit von 24 Monaten startete und die Spezifikation sowie Entwicklung eines Ende-zu-Ende Kommunikationssystems zwischen Elektrofahrzeug und Smart Grid zum Ziel hatte. Hierbei wurde für die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation auf den ISO/IEC 15118 Standard (damals noch in einem Draft-Stadium) gesetzt. Für die Kommunikation zwischen dem in der Ladestation eingebauten Smart Meter und einer zentralen Lastkontrollereinheit (“Load Balance Controller”) wurde auf den IEC 62056 DLMS/COSEM Standard<sup>12</sup> gesetzt, welcher zwar weltweit Anwendung findet, jedoch bspw. nicht in den USA oder Deutschland. Dieser IEC-Standard enthält jedoch noch keine elektrofahrzeugspezifischen Datenobjekte, weshalb im Rahmen des Projekts dieser Standard um ebensolche Objekte erweitert wurde. Eine Übersicht über die Systemarchitektur von Elektrofahrzeug bis zur Lastkontrollereinheit auf Netzseite ist in Abbildung 1.5 dargestellt.

In Abbildung 1.6 wird am Beispiel des Aufbaus einer Ladesession zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation die Interaktion zwischen den Schnittstellen der beiden zum Einsatz kommenden Standards dargestellt. Die ISO/IEC 15118 Nachricht `ChargeParameterDiscoveryReq`, welche wichtige Parameter bzgl. der Ladesteuerung kommuniziert und u. a. in Abschnitt 2.2.1

---

<sup>12</sup><http://www.dlms.com/documentation/dlmscosem specification/iecstandardsforelectricitymetering.html>

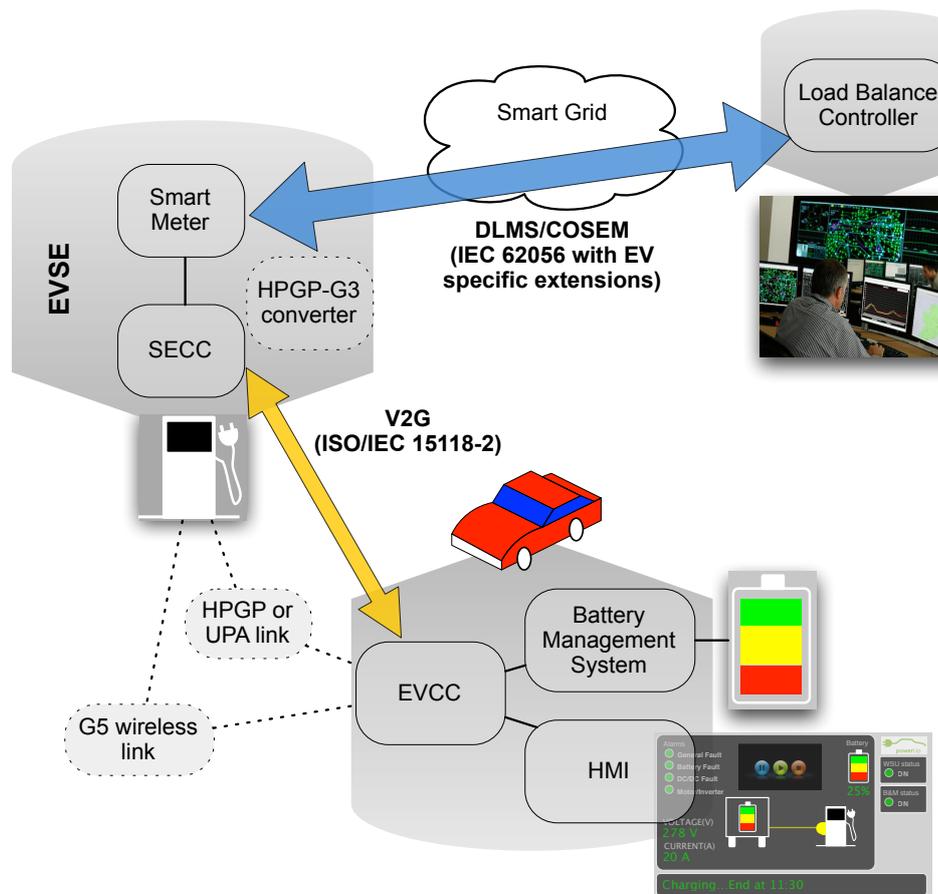


Abbildung 1.5: Systemarchitektur der Kommunikation zwischen E-Fahrzeug und Smart Grid im Projekt PowerUp [42]

noch näher beleuchtet wird, wird vom E-Fahrzeug (EV) an den Kommunikationscontroller in der Ladestation (SECC) gesendet. Dieser wiederum kommuniziert innerhalb der Ladestation über eine Brücke mit dem Smart Meter (SM), welcher sodann eine PUSH-Anfrage an das Smart Grid Kontrollzentrum sendet. Diese Kontrolleinheit sendet ihrerseits mittels einer im IEC 62056 definierten SET-Nachricht, erweitert um elektrofahrzeugspezifische Parameter, ein Ladeprofil samt Tarifinformationen zurück. Der SECC übermittelt durch das Senden der `ChargeParameterDiscoveryRes` Nachricht dieses Ladeprofil weiter an das E-Fahrzeug.

Dieses Einsatzszenario wird bspw. anhand eines Lieferdienstes dargestellt, welcher Pakete innerhalb gewisser Fristen auszuliefern hat und dafür elektrifizierte Lieferwagen einsetzt.

Wie auch schon von den Autoren festgestellt wird, ist die Kommunikation von Seiten der Ladestation in ein Backend über die IEC 62056 DLMS/COSEM Schnittstelle nicht die einzige Möglichkeit. Eine sehr weit verbreitete Alternative stellt bspw. das Open Charge Point Protocol (OCPP) dar, welches in Abschnitt 2.2.2 kurz vorgestellt wird. Weitere Alternativen wie die IEC 61850 Kommunikationsschnittstelle (siehe Abschnitt 2.2.3) für die Kommunikation zwischen dezentralen Energieerzeugungseinheiten wie PV-Anlagen und BHKWs mit einem netzseitigen Lastkontrollzentrum sind denkbar.

Die vorliegende Arbeit unterscheidet sich von den Ansätzen des PowerUp-Projekts vor allem

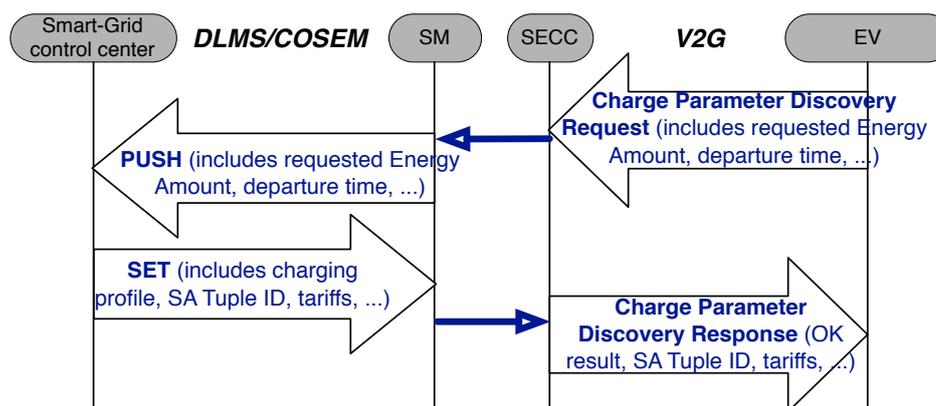


Abbildung 1.6: Interaktion zwischen den ISO/IEC 15118 V2G und IEC 62056 DLMS/COSEM Schnittstellen während des Aufbaus einer Ladesession im Projekt PowerUp [42]

dadurch, dass die Lastkontrolle des E-Fahrzeugs unter Berücksichtigung der Lastsituation in einem Smart Home, wie es in Abschnitt 3.1 noch vorgestellt wird, durchgeführt wird. Im Smart Home Szenario kommen eine Vielzahl sehr heterogener Verbraucher und Erzeuger zum Einsatz, für welche mittels eines geeigneten Optimierungsansatzes ein kostenoptimales Lastprofil unter einer Vielzahl an technischen und nutzerbedingten Restriktionen berechnet und kommuniziert werden muss. Die zentrale Lastkontrollereinheit wird im In-House-Szenario der vorliegenden Arbeit durch ein hierarchisch aufgebautes Energiemanagement-System verkörpert, welches in Abschnitt 3.2 erläutert wird.

Darüber hinaus wurde im PowerUp-Projekt der Aspekt der Rückspeisung von Energie aus dem Fahrzeug nicht betrachtet. Durch das Rückspeisen von Energie wird einerseits das Potential der optimierten Eigenstromnutzung besser ausgeschöpft, andererseits aber auch das Optimierungsproblem komplexer gestaltet.

### 1.3.2 INEES

Das vom Bundesumwelt- und Bauministerium geförderte Projekt INEES – “Intelligente Netzanbindung von Elektrofahrzeugen zur Einbringung von Systemdienstleistungen” –, welches zum 1. Juni 2012 mit einer Laufzeit von drei Jahren startete, hat zum Ziel, mit Hilfe eines Pools von Elektrofahrzeugen Systemdienstleistungen anzubieten und somit diese Fahrzeuge in den Strommarkt, speziell den Regelenergiemarkt, einzubinden, was somit Integrationsszenario 3 adressiert [72]. Mit Hilfe eines Flottenversuchs bestehend aus 20 VW e-up!s, welche der Projektpartner Volkswagen ausgewählten Testkunden bereitstellt, und der Kommunikation der einzelnen E-Fahrzeuge mit einem sogenannten Poolmanager soll ein gemeinsamer virtueller Stromspeicher signifikanter Größe gebildet werden, um die schwankende Produktion von Wind- und Sonnenenergie auszugleichen.

Im Gegensatz zum Projekt PowerUp wird bei INEES, gegeben durch das Projektziel Systemdienstleistungen bereitzustellen, auch Energie rückgespeist, was über 10 kW DC-Wallboxen (an der Wand angebrachte Ladestationen) realisiert wird. Durch ein zu konzipierendes Anreizsystem für Fahrzeugnutzer soll darüber hinaus erforscht werden, in welcher Weise die Nutzer am ehesten dazu zu bewegen sind, die in ihren E-Fahrzeugen gespeicherte Energie für den Poolmanager und somit Regelenergiemarkt bereitzustellen. Der Projektpartner Lichtblick bietet hierfür seine Steuerungssoftware namens “Schwarm-Dirigent” an, welche die Steuerung

der Lade- und Rückspeisevorgänge für die einzelnen Fahrzeuge durchführt.

Leider ist zum aktuellen Zeitpunkt noch keine wissenschaftliche Veröffentlichung zu diesem Projekt verfügbar, was möglicherweise auch damit zu tun hat, dass der zweiteilige Feldversuch erst im April 2014 startete und Evaluationsergebnisse somit noch nicht vorliegen. Es ist jedoch aus Gesprächen mit Projektteilnehmern bekannt, dass als Kommunikationsschnittstelle für die E-Fahrzeuge ebenfalls eine Version des ISO/IEC 15118 Standards eingesetzt wird, erweitert um gewisse Parameter, welche den Austausch von (Steuer-)Informationen bzgl. des Netzzustandes erlauben. Ein direkter Vergleich gestaltet sich jedoch aufgrund mangelnder wissenschaftlicher Publikationen zu diesem Projekt schwierig.

### 1.3.3 Smart V2G

Im Rahmen des über drei Jahre angelegten Projekts SmartV2G, welches im Herbst 2011 startete, erforscht das Fraunhofer ESK die Kommunikationsschnittstellen zur Integration von Elektrofahrzeugen in das Smart Grid unter Anwendung der drahtgebundenen Protokolle IEC 61851 und ISO/IEC 15118 für die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation sowie des IEC 61850 Standards für die Kommunikation mit einem Backend im Smart Grid [28]. Des Weiteren werden drahtlose Kommunikationsprotokolle für diesen Zweck evaluiert. Das Projekt wird von der Europäischen Kommission im Rahmen des 7. Rahmenprogramms der EU gefördert.

In den bereits bestehenden wissenschaftlichen Veröffentlichungen<sup>13</sup> wird der Ansatz verfolgt, mittels einer modellprädiktiven Regelung (Model Predictive Control – MPC) einen Aggregator für E-Fahrzeuge in die Lage zu versetzen, die Ladelaast in einem Netzsegment kostenoptimal zu steuern und das Lastverschiebepotential sowie ggf. Systemdienstleistungen gewinnbringend am Strommarkt zu handeln. Hierbei werden Vorhersagen für die Ankunft von Elektromobilisten an Ladestationen in diesem Netzsegment sowie Annahmen über Strompreise und Laststeuersignale getroffen.

Zwar wird in der Projektbeschreibung und in Pressemitteilungen<sup>14</sup> von der Anwendung des ISO/IEC 15118 Protokolls gesprochen, jedoch finden sämtliche Steuerungsansätze in den Publikationen allein auf der Nutzung des eher rudimentären IEC 61851 Protokolls statt, auf welches in Abschnitt 2.1.2 noch näher eingegangen wird. Auch ist das betrachtete Szenario bei genauerem Hinsehen nicht vergleichbar mit dem der hier vorliegenden Arbeit, da das In-House-Szenario nicht näher betrachtet wird.

### 1.3.4 Aktivhaus B10

Das Projekt, welches sich am ehesten mit dem Konzept dieser Arbeit vergleichen ließe, ist das vor kurzem erst ins Leben gerufene Projekt Aktivhaus B10<sup>15</sup>, welches vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur gefördert wird (Laufzeit 1. März 2012 - 30. April 2016). Das angeblich erste Aktivhaus<sup>16</sup> der Welt ist in der Lage, mehr Energie zu erzeugen als es für den Eigenbedarf benötigt und darüber hinaus noch zwei Elektrofahrzeuge der Marke Smart mit dem nötigen Strom zu versorgen. Die installierten PV-Anlagen erzeugen einen jährlichen Überschuss von 2150 kWh. Die für die Gebäudeforschung relevanten Daten

---

<sup>13</sup><http://www.smartv2g.eu/publications.html>

<sup>14</sup><http://www.esk.fraunhofer.de/de/medien/pressemitteilungen/pm1402.html>

<sup>15</sup><http://www.aktivhaus-b10.de/home/>

<sup>16</sup>Laut Definition der Projektwebseite steht der Begriff “für Gebäude, die allein oder im Verbund mit anderen (in einem sogenannten Aktivhausverbund) mehr Energie erzeugen als sie selbst benötigen”.



### 1.3.5 Fellbach ZEROplus

Ein weiteres Forschungsprojekt mit Bezug zur Integration eines Elektrofahrzeugs in das Energiemanagement eines Haushalts ist das Projekt Fellbach ZEROplus, dessen Förderzeitrahmen sich vom 1. November 2012 bis zum 31. Oktober 2015 erstreckt und welches auf wissenschaftlicher Seite vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) begleitet wird. Ziel des Projektes ist es, für eine Baugruppe von sieben Energieplus-Häusern, welche allesamt mit großen Photovoltaik-Anlagen ausgestattet sind, ebenfalls ein Home-Energy-Management-System (HEMS) zu entwickeln. Dieses soll dafür sorgen, dass der Strombedarf der Haushaltsgeräte sowie der zur Verfügung stehenden Elektrofahrzeuge vorwiegend mit regenerativ erzeugter Energie gedeckt wird. Das HEMS soll darüber hinaus die Energieflüsse auf Benutzungsschnittstellen im Haus visualisieren. Der Einsatz der Systeme soll im realen Betrieb über zwei Jahre demonstriert und wissenschaftlich ausgewertet werden, allerdings existieren zum aktuellen Zeitpunkt noch keine wissenschaftlichen Publikationen.

Die E-Fahrzeuge werden über 22 kW Ladestationen (Wallboxen) aufgeladen und über Mode 3<sup>17</sup> gesteuert. Laut Projektbeschreibung ist eine ISO/IEC 15118 Kommunikationsschnittstelle zwar vorbereitet, jedoch stehen entgegen der ursprünglichen Planung für den realen Betrieb keine E-Fahrzeuge bereit, die diese Schnittstelle implementiert haben<sup>18</sup>. Darüber hinaus können diese Fahrzeuge auch nicht Energie in das Energienetz bzw. die Energieplus-Häuser zurückspeisen, was somit ein weiteres essentielles Unterscheidungsmerkmal zum Projekt iZEUS darstellt, in dessen Rahmen diese Arbeit angefertigt wurde.

### 1.3.6 Toyota City Low-carbon Society Verification Project

Mit Blick auf internationale E-Mobilitätsprojekte ist das Toyota City Low-carbon Society Verification Project [53] hervorzuheben, im Rahmen dessen in Toyota City ein ganzer Stadtteil mit bis zu 227 energieeffizienten Haushalten errichtet wird. Jene Haushalte sind mit PV-Anlagen, stationären Speicherbatterien, Brennstoffzellen sowie Elektro- und Hybridfahrzeugen ausgestattet. Ein HEMS integriert und steuert sämtliche Komponenten eines Hauses und visualisiert auf Touch-Displays für die Bewohner sowohl die Energieflüsse als auch die Preissignale, welche gemäß der Lastsituation im Stadtviertel auch extreme Preisspitzen beinhalten können. Als Anreiz zur Energieeinsparung werden sogenannte “Eco-Punkte” vergeben, welche sich im Sinne eines energieeffizienten und schadstoffarmen Stadtviertels auch für den Kauf von ermäßigten Bustickets oder vergünstigten Produkten im Supermarkt einsetzen lassen.

Dieser zukunftsweisende Ansatz ist einer der wenigen real existierenden Projekte, die das erneuerbare Energien einbindende Lastmanagement auf ein ganzes Stadtviertel ausweiten. Die Kommunikation zwischen den Elektrofahrzeugen und den jeweiligen Ladestationen bzw. HEMS basiert jedoch auf einem proprietären Kommunikationsprotokoll und setzt noch nicht auf die aktuelle Entwicklung eines standardisierten Protokolls nach ISO/IEC 15118.

Das Anwendungsszenario eines Smart Home, dessen thermische und elektrische Verbraucher wie auch Erzeuger sich über ein flexibel und adaptiv agierendes Energiemanagement-System kostenoptimal einplanen lassen, wurde, wie Allerdig [3] gezeigt hat, noch nicht ausgiebig untersucht. Betrachtet man zusätzlich den Aspekt der Einbindung eines rückspeisefähigen Elektrofahrzeugs in ein solches adaptives Energiemanagement mittels der Kommunikationsschnittstelle ISO/IEC 15118, welche sich als weltweiter Standard etablieren wird (vgl. Abschnitt

<sup>17</sup>Siehe Abschnitt 2.1.2 für eine Beschreibung der vier Lademodi gemäß der Norm IEC 61851.

<sup>18</sup>Laut inoffiziellen Informationen sollen Renault ZOE zum Einsatz kommen.

6.1), so finden sich bisher noch keine zufriedenstellenden Untersuchungen in der wissenschaftlichen Literatur.

## 1.4 Wesentliche Beiträge dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich konkret mit den Details des derzeit in der weltweiten Standardisierung befindlichen Kommunikationsprotokolls ISO/IEC 15118, welches den Austausch energierelevanter Mehrwertinformationen zwischen Elektroauto und Ladestation ermöglicht. Es werden ausführlich die entsprechend definierten Nachrichten, Parameter und Restriktionen der Spezifikation dargelegt, welche für einen gesteuerten Ladevorgang nach den Zielvorgaben des Hausbewohners einerseits und denen des Energiemanagements andererseits berücksichtigt werden müssen. Dieses Kommunikationsprotokoll betrachtet den Anwendungsfall der Rückspeisung von Energie nur konzeptionell, in der technischen Spezifikation findet sich jedoch keinerlei konkrete Umsetzung. Daher wird ergänzend hierzu erläutert, wie entsprechende Nachrichten der Protokollspezifikation um geeignete Parameter erweitert werden können, um diesen Anwendungsfall zu realisieren und dennoch eine standardkonforme Implementierung, wie sie im Rahmen dieser Arbeit erfolgte, zu gewährleisten.

Bevor das Elektrofahrzeug am Gesamtenergiemanagement des Smart Home teilnehmen und somit als flexibler Verbraucher und Energiespeicher eingeplant werden kann, ist zunächst ein formales Modell vonnöten, welches einerseits die technischen Restriktionen, die u. a. durch die Batterie induziert werden, und andererseits die Benutzervorgaben abbildet. Im Zuge dieser formalen Modellierung werden die entsprechenden Parameter der ISO/IEC 15118 Spezifikation auf die mathematischen Variablen des Optimierungsproblems abgebildet, um somit eine realitätsgetreue Optimierung durchführen zu können.

Letzten Endes muss eine Implementierung des ISO/IEC 15118 Protokolls auch in der Lage sein, sich in das bestehende Energiemanagement-System des Smart Home einzugliedern, um das Elektrofahrzeug überhaupt erst in die Gesamtoptimierung einbinden zu können. Hierfür ist die Entwicklung eines eigenen Treibers zur Anbindung des Elektrofahrzeugs über das ISO/IEC 15118 Protokoll notwendig. Zusätzlich ist die Realisierung einer observierenden und steuernden Komponente gemäß den Prinzipien des Organic Computing [45] und der daraus entwickelten generischen Observer/Controller-Architektur, auf welcher das Energiemanagement fußt, essentiell. Diese Elemente (Observer, Controller und Treiber) sowie die Kodierung der energierelevanten Mehrwertinformationen zur Einplanung des E-Fahrzeugs in das auf einem evolutionären Algorithmus basierende Gesamtenergiemanagement bilden den Kern des Beitrags dieser Arbeit.

Das hier vorgestellte und implementierte Kommunikationsprotokoll wird darüber hinaus hinsichtlich diverser Kriterien wie Akzeptanz, Erweiterbarkeit, Sicherheit, Komplexität und Effizienz untersucht, um eine Aussage bezüglich seiner Zukunftsfähigkeit treffen zu können und somit dem interessierten Leser einen kritischen und gut informierten Blick auf diese Spezifikation mitzugeben.

## 1.5 Gliederungsübersicht

Nach der einführenden Motivation zum Forschungsgegenstand dieser Arbeit gibt Kapitel 2 eine Übersicht über die Standardisierungsinitiativen, welche die hard- und softwareseitigen Schnittstellen und Komponenten im Bereich der E-Mobilität<sup>19</sup> zum Zwecke der Interoperabilität verschiedener Implementierungen vereinheitlichen sollen. In diesem Grundlagenkapitel wird vor allem auch das bereits angesprochene Kommunikationsprotokoll ISO/IEC 15118 näher beleuchtet, dessen Funktionsweise für das weitere Verständnis dieser Arbeit unabdingbar ist.

Im sich daran anschließenden dritten Kapitel wird der Versuchsaufbau vorgestellt, in dessen Rahmen die Evaluationen stattfinden. Hierbei werden alle relevanten Komponenten des realen Smart Home sowie das im Einsatz befindliche Energiemanagement-System eingeführt. Darüber hinaus wird detailliert erläutert, in welcher Weise das Elektrofahrzeug kommunikationstechnisch an das EMS angebunden wurde.

Die Integration des als flexibel steuerbare Last und gleichzeitig Verbraucher agierenden Elektroautos in die Architektur des EMS wird ausführlich in Kapitel vier dargelegt. Hierbei wird die Funktionsweise und Aufgabe jeder einzelnen Komponente – Treiber, Observer und Controller – sowie diverse mögliche Kodierungsschemata für den Austausch energierelevanter Mehrwertinformationen samt ihrer Vor- und Nachteile im Detail besprochen.

Kapitel fünf stellt einen von den vorigen Kapiteln etwas losgelösteren Abschnitt dar, welcher jedoch das Potential des ISO/IEC 15118 Protokolls hinsichtlich des E-Roamings beleuchtet und eine wichtige weitere Grundlage liefert, um im ersten Teil des Kapitels 6 eine Evaluation ebendieses Protokolls durchführen zu können. Das Evaluationskapitel legt in seinem zweiten Teil den Fokus auf die Ergebnisse der Integration des rückspeisefähigen Elektroautos in das EMS des Smart Home und stellt klar, welche Vorteile ein gesteuerter Ladevorgang hinsichtlich Eigenstromoptimierung und Stromkostenreduktion mit sich bringt.

Diese Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung sowie einem Ausblick auf weitere sinnvolle Forschungstätigkeiten in diesem thematischen Umfeld.

---

<sup>19</sup>Die Begriffe Elektromobilität und E-Mobilität werden fortan synonym verwendet.



## KAPITEL 2

# STANDARDISIERUNGSINITIATIVEN FÜR INTEROPERABLE E-MOBILITÄTSLADELÖSUNGEN

Der Schlüssel zum Erfolg für eine neu in der Gesellschaft zu etablierende Technologie ist eine gemeinsame Einigung der Interessensvertreter auf gewisse Standards, welche einerseits Interoperabilität zwischen verschiedenen Implementierungen dieser neuen Technologie und andererseits Investitionssicherheit für die betreffenden Akteure sichert. Im Bereich der Elektromobilität gibt es diverse technologische Schnittstellen auf Hardware- wie auf Softwareseite, auf die sich gleich mehrere unterschiedliche Industriezweige einigen müssen, die bis dato noch nie miteinander kooperieren mussten. So sind sowohl die Automobilhersteller als auch die Ladeinfrastrukturbetreiber, deren Zulieferer und die Vertreter der Energiewirtschaft daran interessiert, einerseits dem Endkunden ein reibungsloses Elektromobilitätsenerlebnis und somit eine profitable Marktakzeptanz zu schaffen und andererseits etwaige Transaktionskosten zwischen den Schnittstellen möglichst gering zu halten.

Dieses Kapitel wird daher die hard- und softwareseitigen Schnittstellen und Komponenten, welche im Bereich der E-Mobilität durch Standardisierungsinitiativen bereits genormt werden und grundlegend für das weitere Verständnis dieser Arbeit sind, näher erläutern.

### 2.1 Standardisierung der Hardwareschnittstellen

Spricht man im Rahmen der Elektromobilität von einem Ladestecksystem, speziell im Bereich der elektrifizierten Pkws, so beinhaltet dieses System die vier Komponenten

- fahrzeugseitige Buchse, auch Fahrzeugkupplung genannt (vehicle inlet),
- fahrzeugseitiger Stecker (connector),
- ladestationsseitiger Stecker (plug) und
- ladestationsseitige Steckdose (socket outlet),

welche auch in Abbildung 2.1 zusammenhängend dargestellt werden. Im Falle des Wechselstromladens (im Bild mit *Alternating Current (AC)* bezeichnet) ist das Ladekabel, welches die beiden Steckerenden verbindet, transportabel, wohingegen beim Gleichstromladen (im Bild

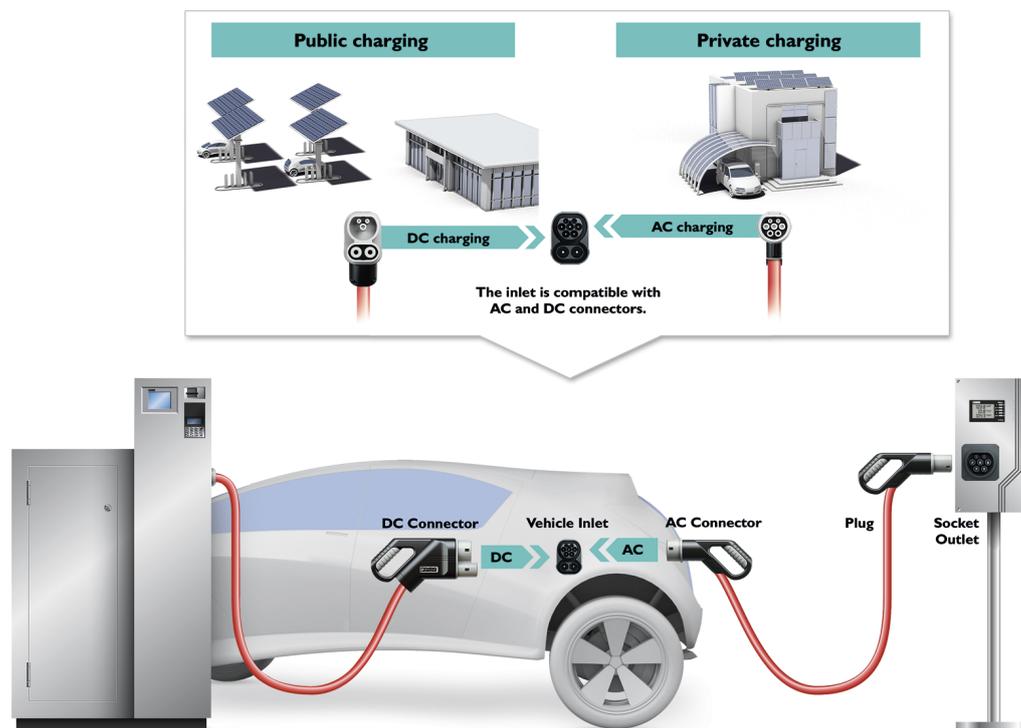


Abbildung 2.1: Gesamtbild eines Ladestecksystems bestehend aus Buchsen, Steckern und Steckdose. Hier: das Combined Charging System (CCS) für das AC- und DC-Laden (Quelle: Phoenix Contact)

mit *Direct Current (DC)* beschrieben) der ladestationsseitige Stecker fest mit der Ladestation verbunden ist. Der offizielle in sämtlichen Standardisierungsdokumenten die Elektromobilität betreffend verwendete Terminus für das Elektroauto ist *Electric Vehicle (EV)*, während die Ladestation als *Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE)* bezeichnet wird.

Es gibt grundsätzlich zwei Arten, die Batterie in einem Elektrofahrzeug wieder aufzuladen, nämlich das konduktive (kabelgebundene) und das induktive (kabellose) Laden. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem konduktiven Laden, da dieser Anwendungsfall den kurz- bis mittelfristig vorherrschenden Weg darstellen wird, ein Elektrofahrzeug zu laden, in Anbetracht der meist noch in Pilotstadien befindlichen kabellosen Ladesysteme. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich die induktiven Ladesysteme durchsetzen und kabelgebundene Systeme vom Markt verdrängen werden, allein aufgrund des höheren Benutzerkomforts (kein Ladekabel, welches bspw. im Winter durch Schnee und Dreck schmutzige Hände verursacht). Abschnitte 2.1.1 und 2.1.2 geben einen Überblick über die hardwareseitigen Standardisierungsbemühungen, welche eine *physikalische Interoperabilität* zwischen Ladestation und Elektrofahrzeug gewährleisten sollen.

### 2.1.1 IEC 62196

Die Europäische Kommission beauftragte im Juni 2010 die drei offiziellen europäischen Standardisierungsorganisationen (das Europäische Komitee für Normung (CEN), das Europäische Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC) und das Europäische Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI)), auf Basis einer Standardisierungsinitiative der International Electrotechnical Commission (IEC) einen europäischen Standard für ein E-Mobilitäts-Ladestecksystem zu entwerfen. Eine Reihe von Vorschlägen das Aussehen und die technische Spezifikation der Steckertypen betreffend wurden daraufhin von diversen Industriegremien aus zahlreichen Ländern eingereicht, was letzten Endes in der IEC 62196 Standardisierungsserie [1] mündete, betitelt mit „Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker – Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen“.

Teil 1 (IEC 62196-1) der mittlerweile dreiteiligen Norm geht auf generelle Anforderungen an das Ladestecksystem gemäß den vier Lademodi ein, wie sie in der Norm IEC 61851-1 [37] für AC- und DC-Laden definiert und in Abschnitt 2.1.2 näher beschrieben werden. Diese Anforderungen betreffen Berührungsschutz, Festlegungen bzgl. Nennspannung und Stromstärke sowie die Auslegung der Kontaktstifte für Signalisierungs- und Steuerungszwecke. Teil zwei definiert die Dimensionskompatibilität zwischen den diversen AC-Steckervarianten, wohingegen Teil drei (noch in der Entwurfsphase) sich mit dem Ladestecksystem für das DC-Laden sowie die kombinierte AC/DC-Ladesschnittstelle beschäftigt.

Im Rahmen der IEC 62196-2 und -3 Normungsserie werden drei Typen von Ladestecksystemen unterschieden, welche in unterschiedlichen Teilen der Welt vorwiegend zum Einsatz kommen. Typ 1 ist dabei die maßgeblich in den USA und in Japan eingesetzte Stecksystemvariante, Teil 2 hingegen hat sich größtenteils in Europa durchgesetzt und Teil 3 kommt in China zum Einsatz. Abbildung 2.2 illustriert die verschiedenen Gesichter aller Ladestecker und -buchsen in einer Matrix.

Am 24. Januar 2013 wurde auf Entscheidung der Europäischen Kommission ein Richtlinien-vorschlag veröffentlicht [25], welcher das deutsche Typ 2<sup>1</sup> sowie das CCS-Ladestecksystem Combo2, auf welches in diesem Abschnitt noch eingegangen wird, als europäischen Standard definiert. Dieser Vorschlag wurde am 9.4.2014 vom Europäischen Parlament beschlossen [27] und beendete somit die Diskussion und Unsicherheit bei Herstellern und Kunden bzgl. eines einheitlich zu nutzenden Systems – zumindest in Europa.

Das Typ 2 Ladestecksystem unterstützt sowohl das einphasige als auch das dreiphasige<sup>2</sup> Wechselstromladen, wobei letzteres höhere Ladeleistungen und somit auch kürzere Ladezeiten erlaubt. Amerikanische wie auch japanische Hausinstallationen erlauben nur das einphasige AC-Laden aufgrund ihres 100-120/240 V Netzanschlusses, weshalb das Typ 1 Ladestecksystem in diesen Ländern auch bevorzugt wird. In Europa und China wurde hingegen ein einphasiger 230 V sowie ein dreiphasiger 400 V Netzanschluss realisiert. Nichtsdestotrotz haben sich Automobilhersteller weltweit darauf geeinigt, dass jedes in Europa verkaufte Elektrofahrzeug spätestens zum Jahre 2017 mit der Typ 2 Ladesteckvorrichtung ausgestattet sein wird [2] [70]. Bis dahin kann die Kompatibilität zwischen Ladestationen und Elektrofahrzeugen, welche mit unterschiedlichen auf IEC 62196 basierenden Ladesteckvorrichtungen ausgerüstet sind, mit Hilfe von Adaptern gesichert werden.

---

<sup>1</sup>Der deutsche Vorschlag für das Typ 2 Ladestecksystem wird informell auch als „Mennekes-Stecker“ bezeichnet, benannt nach der Firma Mennekes, welche diesen Ladestecker bereits im Jahre 2009 einführte.

<sup>2</sup>Das Dreiphasenwechselstromsystem, wie es bspw. in Deutschland Anwendung findet, wird für Transport und Verteilung von elektrischer Energie in Stromnetzen eingesetzt. Es besteht aus drei Wechselströmen gleicher Frequenz, welche zueinander in ihren Phasenwinkeln um 120 Grad verschoben sind.

	Type 1/USA	Type 2/Europa	GB/China
Alternating current (AC)	 SAE J1772/IEC 62196-2	 IEC 62196-2	 GB Part 2
Direct current (DC)	 IEC 62196-3	 IEC 62196-3	 GB Part 3/IEC 62196-3
„Combined AC/DC charging system“	 SAE J1772/IEC 62196-3	 IEC 62196-3	

Abbildung 2.2: Überblick über den weltweiten Einsatz der normierten Ladestecksysteme für Elektromobilität. GB steht für Guobiao, chinesisch für “Nationaler Standard” (Quelle: Phoenix Contact)

Im Oktober 2011 präsentierten die acht Automobilhersteller Audi, BMW, Chrysler, Daimler, Ford, GM, Porsche und VW auf dem 15. VDI-Kongress ihren Vorschlag für eine einheitliche Ladeschnittstelle (fahrzeugseitige Ladebuchse wie auch Ladestecker), welche die AC- und die DC-Lademöglichkeiten vereint: das *Combined Charging System (CCS)*. Dieser Vorschlag floss in die internationale Standardisierung ein und wird seither unter der IEC 62196-3 Spezifikation genormt, welche sich bisher noch im Entwicklungsstadium befindet. Das Design der fahrzeugseitigen Ladebuchse ist Abbildung 2.3 zu entnehmen, das des Ladesteckers Abbildung 2.4. Die Buchse kombiniert den bereits existierenden Typ 1 oder Typ 2 AC-Teil im oberen Abschnitt mit zwei großen zusätzlichen Pins, welche für die hohen DC-Ladeströme genutzt werden, im unteren Abschnitt. Beim Gleichstromladen wie auch beim Wechselstromladen wird die Kommunikation über die entsprechenden AC-Pins des oberen Abschnitts abgewickelt. Je nach Einsatzgebiet des CCS-Systems (USA, Europa, Japan, China, etc.) unterscheidet sich das Design des oberen Abschnitts gemäß der Typ 1 bzw. Typ 2 Spezifikation, welche auch als „Combo1“ (USA, Japan) bzw. „Combo2“ (Europa, China) Systeme bezeichnet werden. Die weltweit agierenden Automobilhersteller haben sich bei der Gestaltung der CCS-Schnittstelle auf ein Maß geeinigt, welches Rückwirkungen auf die Karosseriebauten verhindert und somit mit den Maßen des bewährten Tankdeckels übereinstimmt [66].

Abbildung 2.5 zeigt zum Vergleich einen Typ 2 Ladestecker für ein- und dreiphasiges AC-Laden, anhand dessen die Belegung der 7 Pins, von denen 3 Pins auch im CCS-Stecker für die Kommunikation genutzt werden, erläutert werden soll. Die drei stromführenden Phasen sind in dieser Abbildung mit L1, L2 und L3 beschriftet, der mit PP bezeichnete Proximity Pilot-Pin (auch „Plug Present“) dient der Überprüfung, ob ein Ladekabel eingesteckt wurde, N



Abbildung 2.3: Fahrzeugseitige Ladebuchse nach der Combined Charging System Spezifikation (Quelle: Phoenix Contact)

Abbildung 2.4: DC-Ladestecker nach der Combined Charging System Spezifikation (Quelle: Phoenix Contact)

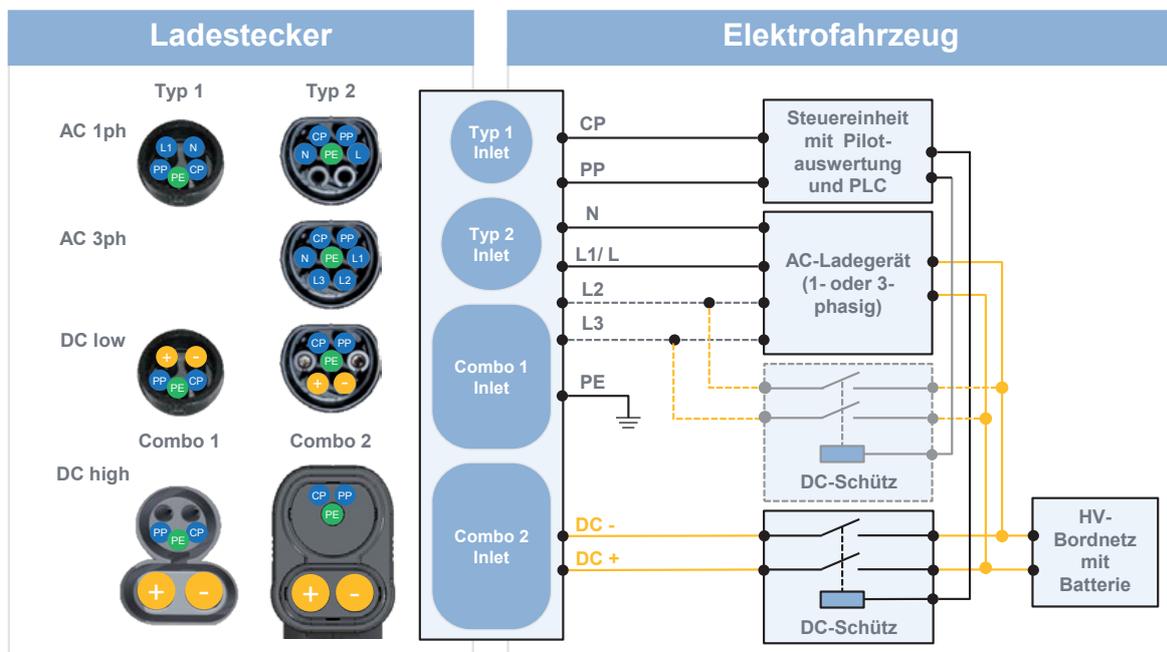


Abbildung 2.5: Ein Typ 2 Ladestecker für ein- und dreiphasiges AC-Laden (Quelle: Mennekes)

ist der Neutralleiter und CP (Control Pilot) der für die Kommunikation zwischen Elektroauto und Ladestation genutzte Pin, auf welchen in Abschnitt 2.1.2 noch näher eingegangen wird. In der Mitte befindet sich der Schutzleiter, auch „Protective Earth“ (PE) genannt.

Das Combined Charging System ermöglicht im Falle des AC-Ladens Ladeleistungen von bis zu 22 kW (bei 480 V und 32 A) und im Falle des DC-Ladens Leistungen von bis zu ca. 170 kW (bei 850 V und 200 A) [56] und ist somit für Anwendungsfälle vom langsamen einphasigen und schnelleren dreiphasigen AC-Laden zu Hause bis hin zum sehr schnellen DC-Laden an speziellen öffentlichen Ladestationen geeignet. Schnellladestationen werden daher oft damit beworben, dass sie einen leeren Akku innerhalb einer halben Stunde auf 80 % volladen können. Die European Automobile Manufacturers Association (ACEA) hat sich darauf geeinigt, dass das CCS als Standardschnittstelle für AC/DC-Ladestecksysteme in allen neuen Fahrzeugen ab dem Jahr 2017 verbaut sein wird [2].

Abbildung 2.6, welche aus der deutschen Normungsroadmap 2.0 [51] stammt, die im Herbst 2014 neu aufgelegt werden wird, bietet zum Thema Ladestecker eine Übersicht, welche die Funktionsweise der Typ 1 und Typ 2 Stecker sowie des darauf aufbauenden CCS im Zusammenhang mit den entsprechenden Komponenten im Elektrofahrzeug erläutert. In diesem



Quelle: BMW & Initiative Ladeschnittstelle

Abbildung 2.6: Combined Charging System zum AC- und DC-Laden mit den Steckvorrichtungen Typ 1, Typ 2, Combo 1 und Combo 2 [51]

Bild wird die unterschiedliche Nutzungsweise des Typ 1 und Typ 2 Steckers hinsichtlich ein- und dreiphasigem Wechselstromladens sowie langsamem (DC low) und schnellem (DC-high) Gleichstromladens illustriert. Mit den gelben „+“- und „-“-Kreisen wird deutlich gemacht, dass mit entsprechender Pin-Belegung der Typ 1 und Typ 2 Steckervorrichtung (bei Typ 2 werden bspw. Phase 2 und 3 als dedizierte DC-Pins genutzt) auch langsames DC-Laden ermöglicht werden kann. Beim Combo 1 und 2 System hingegen werden immer CP, PP und PE Pin des oberen AC-Teils für die Steuerung des Ladevorgangs genutzt.

Neben dem europäischen Schnellladesystem CCS konkurriert noch das aus Japan stammende

de CHAdeMO-System um die Marktvorherrschaft, wobei zur Zeit noch nicht abzusehen ist, ob eines der beiden Systeme in Zukunft das andere verdrängen wird, oder eine Koexistenz bestehen bleibt. Zumindest in Europa, speziell Deutschland, gibt es große Bestrebungen, das Combined Charging System als Standard zu etablieren, was auch mit dem Verbundprojekt „SLAM – Schnellladenetz für Achsen und Metropolen“ untermauert wird [16]. Im Rahmen dieses u. a. von den Autoherstellern BMW, Daimler, Porsche und VW, vom Energieversorger EnBW sowie vom BMWi unterstützten Projekts sollen bis zum Jahr 2017 400 Schnellladestationen im Abstand von 50 bis 70 km in Deutschland aufgebaut werden, welche mit dem Typ 2 Ladestecksystem sowie dem CCS ausgestattet werden. Das Projekt wird auf wissenschaftlicher Seite vom Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT) der Universität Stuttgart sowie von der RWTH Aachen begleitet.

Der IEC 62196 Standard basiert wiederum auf der IEC 61851 [37] Norm. In diesem internationalen Standard wird ein analoges Protokoll auf niedriger Ebene spezifiziert, über das die grundlegenden Signalisierungsmechanismen ablaufen, welche den Ladevorgang eines Elektrofahrzeugs an einer Ladestation überhaupt erst ermöglichen.

### 2.1.2 IEC 61851

Elektrofahrzeuge können grundsätzlich in vier verschiedenen Lademodi geladen werden, welche in der IEC 61851 Norm spezifiziert sind. Diese Modi unterscheiden sich hinsichtlich erlaubter Ladeströme, der eingesetzten Kommunikationsmechanismen mit dem Fahrzeug sowie den einzuhaltenden Sicherheitsrichtlinien.

- Mode 1:  
Das Elektrofahrzeug ist mit dem Wechselstromnetz verbunden, welches mit 16 A abgesichert ist und eine Spannung von bis zu 250 V (einphasig) bzw. 480 V (dreiphasig) liefert. Diese üblicherweise in einem Haushalt vorzufindenden Steckdosentypen werden auch mit SCHUKO (für Schutzkontakt) oder CEE bezeichnet.
- Mode 2:  
Das Elektrofahrzeug ist mit dem Wechselstromnetz verbunden, welches mit 32 A abgesichert ist und eine Spannung von bis zu 250 V (einphasig) bzw. (480 V) dreiphasig liefert (SCHUKO oder CEE). Hierbei ist im Ladekabel eine sogenannte „In-cable control box“ (ICCB) als Überstromschutz und zur Erkennung eines Fehlerstroms (FI-Schutzschalter) sowie zur Ladestromsteuerung integriert. Ein solches Ladekabel mit integrierter ICCB ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Der Ladestromrichter, welcher den Wechselstrom aus dem Stromnetz in Gleichstrom für die Batterie richtet, befindet sich im Fahrzeug.
- Mode 3:  
Das Elektrofahrzeug ist mit dem Stromnetz über eine dedizierte Ladestation verbunden, welche zur Kommunikation mit einem Modul zur *Pulsweitenmodulation (PWM)* ausgestattet ist und darüber hinaus einen FI-Schutzschalter, Ladeschütze (Relais) und eine spezielle Ladebuchse aufweist. Der Ladestromrichter befindet sich im Fahrzeug.
- Mode 4:  
Ähnlich zu Mode 3 mit der Ausnahme, dass der Ladestromrichter sich nicht im Fahrzeug, sondern in der Ladestation befindet, aufgrund dessen der direkt gelieferte Gleichstrom höhere Ladeleistungen und eine kürzere Ladedauer erlaubt.



Abbildung 2.7: Typ 2 Ladekabel für ein- und dreiphasiges AC-Laden nach Mode 2 mit integrierter ICCB (Quelle: Mennekes)

Wie dieser Auflistung zu entnehmen ist, steigen die Sicherheitsanforderungen von Mode 1 bis Mode 3, weshalb die ACEA Mode 3 als zwingend anzuwendenden Lademodus für öffentliche Ladestationen vorsieht. Mode 2 soll bei Heiminstallationen zum Einsatz kommen, sofern keine Mode 3 Ladestation zur Verfügung steht.

Bevor der eigentliche Ladevorgang beginnen kann, findet eine vorausgehende analoge Kommunikation zwischen dem Elektrofahrzeug und der Ladestation in den Modi 2, 3 und 4 statt. Der bereits erwähnte Control Pilot (CP) Leiter, welcher im IEC 62196 Ladekabel integriert ist, erlaubt die Unterscheidung zwischen diversen Verbindungszuständen durch die Messung des elektrischen Widerstands [V] im Kabel.

- Zustand A (+12 V):  
Elektrofahrzeug ist nicht mit der Ladestation verbunden
- Zustand B (+9 V):  
Elektrofahrzeug ist mit der Ladestation verbunden, aber noch nicht ladebereit
- Zustand C (+6 V):  
Elektrofahrzeug ist mit der Ladestation verbunden und ladebereit (keine Ventilation)
- Zustand D (+3 V):  
Elektrofahrzeug ist mit der Ladestation verbunden und ladebereit (Ventilation nötig)
- Zustand E (0 V):  
Netzproblem oder Netz nicht verfügbar, Pilotleiter-Kurzschluss gegen Erde, ...
- Zustand F (-12 V):  
EVSE nicht verfügbar

Darüber hinaus definiert die IEC 61851 einen Mechanismus, welcher die ladestationsseitig maximal erlaubten Ladeströme mittels eines analogen pulswidenmodulierten Signals auf den CP-Leiter aufmoduliert und dafür sorgt, dass Ladeströme stets nur bei einem stehenden Fahrzeug fließen können. Bei einer Pulsweitenmodulation wechselt der elektrische Strom ständig zwischen zwei Werten, wobei bei einer konstanten Frequenz der Tastgrad des Stromimpulses (das Tastverhältnis oder auch Pulspausenverhältnis) moduliert wird. Abbildung 2.8 soll diesen Mechanismus anhand eines Beispiels erläutern.

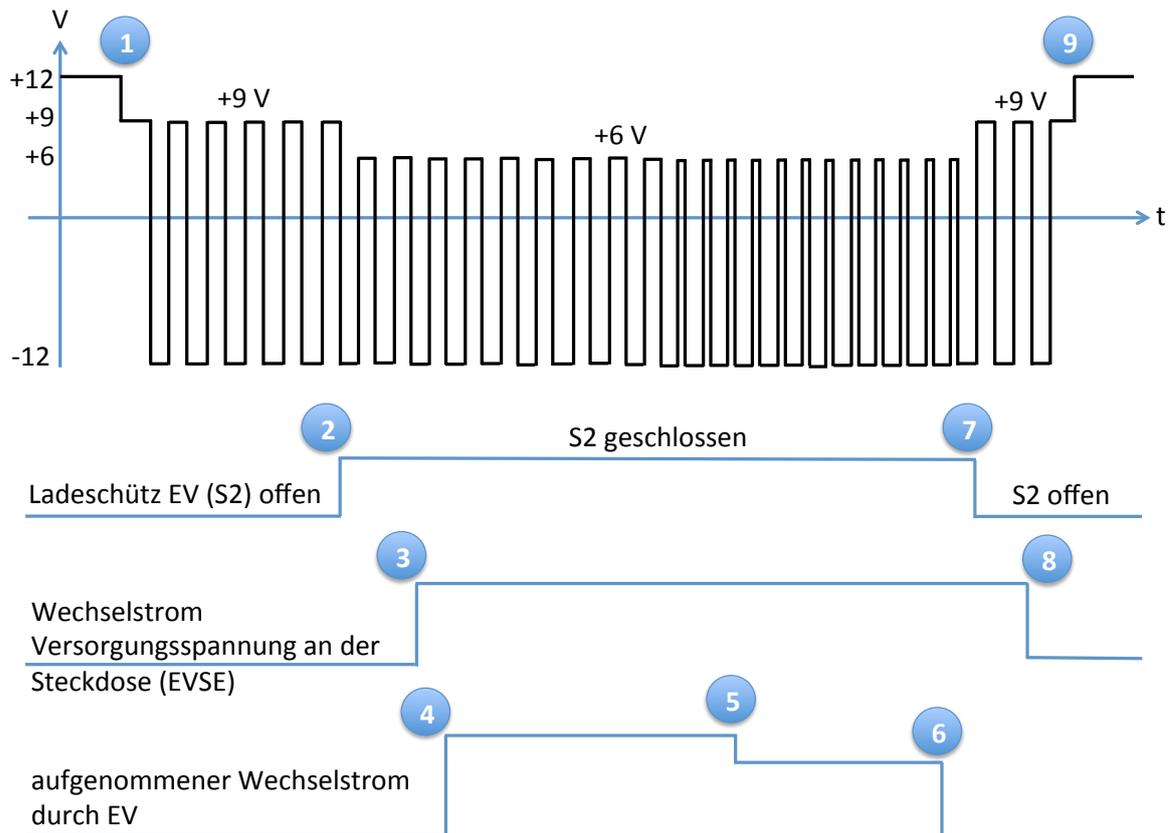


Abbildung 2.8: Beispielhafter Ladezyklus illustriert anhand eines PWM-Signals (angelehnt an [37], Anhang A)

Solange kein E-Fahrzeug über ein Ladekabel mit einer Ladestation (EVSE) verbunden ist, wird die volle Generatorspannung von  $12$  V zwischen Pilotleiter (CP-Pin) und Erde gemessen. Wird nun ein solches Fahrzeug mit der EVSE verbunden  $\ominus$ , so wird dies durch ein gemessenes  $9$  V Signal festgestellt. Dies entspricht nun dem Zustand B. Infolgedessen ist die Ladestation nun zur Stromversorgung bereit und zeigt dem E-Fahrzeug den verfügbaren Strom durch das Tastverhältnis (PWM-Signal) an, wobei die Spannung anfängt, zwischen  $+9$  V und  $-12$  V zu wechseln. Sobald das PWM-Signal vom Ladesteuergerät im Fahrzeug empfangen wurde, wird die Nennleistung entsprechend angepasst und der Ladestecker fahrzeugseitig verriegelt. Daraufhin wird das Fahrzeug seinen Ladeschütz (mit S2 bezeichnet) schließen  $\ominus$ , was mit einem Zustandsübergang von B nach C einhergeht und somit die Ladebereitschaft des Fahrzeugs signalisiert. Durch das Schließen des S2 wird die Spannung auf  $+6$  V heruntergezogen.

Nach einer kurzen Zeitspanne wird infolgedessen die Ladestation ihrerseits den Ladestecker verriegeln und den Stromkreis schließen  $\textcircled{3}$ , indem sie den Hauptschütz schließt. Wenn Zustand D (+3 V) festgestellt wird, so werden die Schütze ladestationsseitig nur geschlossen, sofern die Belüftungsanforderung erfüllt ist. Kurz darauf beginnt auch schon die Energieaufnahme durch das Fahrzeug  $\textcircled{4}$ . Zwischenzeitlich kann es zu einer Forderung nach Leistungsreduzierung kommen, wodurch das von der EVSE angezeigte Tastverhältnis geändert wird  $\textcircled{5}$ .

Während des Ladevorgangs wird die Erdung (Protective Earth – PE) vom Control Pilot (Pilotleiter) konstant überwacht. Möchte das Fahrzeug nun seinen Ladevorgang beenden, so wird es die Energieaufnahme stoppen  $\textcircled{6}$  und gleich darauf seinen S2 wieder öffnen  $\textcircled{7}$ , womit das Spannungslevel wieder auf +9 V gehoben und ein Zustandsübergang von C (bzw. D) auf B erfolgen wird. Sobald nun die Ladestation ebenfalls Zustand B feststellt, wird sie ihrerseits ihren Hauptschalter öffnen  $\textcircled{8}$ , was dazu führt, dass keine Spannung mehr an der Steckdose anliegt. Wird letzten Endes das Ladekabel von der Ladestation entfernt, so wird das gemessene Spannungslevel an der Station wieder auf 12 V gehoben.

Laut der IEC 61851 muss ein Tastverhältnis von 5 % verwendet werden, um den Pilotleiter für die digitale Kommunikation und zur Überwachung des externen Ladegerätes im E-Fahrzeug verwenden zu können. Damit ist diese Norm ein *analoges, sicherheitstechnisches Protokoll auf niedriger Ebene* und das Laden über Mode 3 die bisher gängigste Methode, die Batterie eines Elektrofahrzeugs wieder aufzuladen.

Der Vollständigkeit halber soll noch erwähnt werden, dass der Teil der IEC 61851, welcher für den kabelgebundenen Ladeprozess spezifiziert wurde, sich in IEC 61851-1, IEC 61851-21 und IEC 61851-22 aufgliedern lässt. Für das weitere Verständnis dieser Arbeit sind weitere Details zu diesen spezifischen Dokumenten jedoch nicht relevant und finden daher keine nähere Betrachtung.

Dieser Abschnitt sollte zeigen, dass eine grundlegende und rudimentäre Laststeuerung über ein standardisiertes Protokoll bereits möglich ist. Allerdings ist es nicht möglich, über die IEC 61851 *energierelevante Mehrwertinformationen* zu übertragen, welche eine genauere *Planbarkeit der Lastverschiebung* erlauben. Mit Hilfe von Informationen bzgl. der Gesamtenergiemenge, die das Elektrofahrzeug für eine vollgeladene Batterie noch benötigt oder gar des vom Fahrer geplanten Abfahrtszeitpunkts könnte die *Flexibilität des Ladebedarfs* ausgeschöpft werden, um ein signifikantes Lastverschiebepotential zu heben und eine vorteilhafte Laststeuerung erst zu ermöglichen.

Es bedarf also eines oder mehrerer leistungsfähiger Kommunikationsprotokolle zwischen Elektroauto und Ladestation samt dahinter liegenden Systemen, um diese und weitere energierelevanten Mehrwertinformationen zu erheben, übertragen und zu verarbeiten, und die in Abschnitt 1.1 vorgestellten Szenarien der Integration eines Elektrofahrzeugs in das Energienetz verwirklichen zu können. Die weltweite Standardisierung der Kommunikationsschnittstelle zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation ist das Ziel der in der Entwicklung befindlichen Norm ISO/IEC 15118, auf welche im folgenden Abschnitt 2.2.1 näher eingegangen wird. Die Weiterverarbeitung relevanter Informationen zwischen einer Ladestation und einem Backend, welches die Lücke einer durchgängigen Informationsübertragung und -verarbeitung bis hin zum Energievertrieb bzw. Netzbetreiber schließt, findet in Abschnitt 2.2.2 eine nähere Betrachtung.

## 2.2 Standardisierung der Kommunikationsprotokolle

Nachdem im Abschnitt 2.1 die zu standardisierenden hardwareseitigen Schnittstellen für einen interoperabel funktionierenden Ladevorgang eines Elektrofahrzeugs vorgestellt wurden, konzentriert sich dieser Abschnitt auf die Kommunikationsprotokolle, welche die Erhebung, Übermittlung und Verarbeitung energierelevanter Mehrwertinformationen erlauben. Ziel solcher Protokolle muss es sein, einen gesteuerten Ladevorgang zu ermöglichen, welcher sowohl den gewünschten Ladezustand des E-Fahrzeugs (auch als *State of Charge (SOC)* bezeichnet) zum Ende des Ladevorgangs gewährleistet, als auch mittels der steuernden Instanz<sup>3</sup> eine minimale Abweichung von einem gewünschten Lastprofil realisiert.

### 2.2.1 ISO/IEC 15118

Im Jahre 2009 schlossen sich die Internationale Organisation für Normung (International Organization for Standardization – ISO) und die Internationale Elektrotechnische Kommission (International Electrotechnical Commission – IEC) zusammen und starteten eine Standardisierungsinitiative, welche basierend auf einem gemeinsamen internationalen Verständnis die Spezifikation eines *digitalen IP-basierten Kommunikationsprotokolls* zwischen Elektrofahrzeug (EV) und Ladestation (EVSE) zum Ziel hatte. Dieses Protokoll soll einen benutzerfreundlichen „Plug-and-Charge“-Mechanismus für die *Authentifizierung, Autorisierung, Abrechnung und flexible Lastkontrolle* ermöglichen. Jene Initiative führte zum aktuell noch in der Entwicklung befindlichen Standard ISO/IEC 15118, betitelt mit „Road vehicles - Vehicle to grid communication interface“. Es sei an dieser Stelle gleich erwähnt, dass der Ausdruck „Vehicle to grid“ dieses Titels etwas irreführend ist, da es sich tatsächlich nur um eine direkte Kommunikation zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation, nicht einem hinter der Ladestation kommunikationstechnisch angebundenen Dritten handelt.

Dieses Kommunikationsprotokoll baut auf der Signalisierung entsprechend der Prozedur nach IEC 61851 auf und ergänzt somit das analoge sicherheitstechnische Protokoll um ein digitales Protokoll auf höherer Kommunikationsebene. Die bidirektionale Kommunikation zwischen EV und EVSE beginnt, sobald ein PWM-Signal von 5% auf dem CP-Pin anliegt. Man hat sich unter anderem deswegen auf dieses Tastverhältnis geeinigt, da der entsprechende Ladestrom zu gering wäre, um effizient Energie zu übertragen. Die Aushandlung der Leistungsparameter erfolgt somit nicht mehr auf analoger Ebene, sondern mittels der im ISO/IEC 15118 spezifizierten Parameter, wie gleich erläutert werden wird.

Dieser Standard untergliedert sich wiederum in acht verschiedene Teildokumente. Eine Übersicht über die Dokumentenstruktur der ISO/IEC 15118 samt aktuellem Dokumentenstadium und geplantem Übergang zum nächsten Stadium (jeweils incl. Veröffentlichungsmonat) sind Tabelle 2.1 zu entnehmen. Während eines jeden Standardisierungsprozesses unter der Führung der ISO durchläuft ein zu standardisierendes Dokument verschiedene Stadien: Zuerst wird ein Vorschlag für einen Standard (New Working Item Proposal – NWIP) unterbreitet, danach ein Komitee-Entwurf (Committee Draft – CD) entwickelt, dem ein Entwurf für einen internationalen Standard (Draft for International Standard – DIS) folgt, bis schließlich der finale Entwurf (Final Draft for International Standard – FDIS), an welchem letztlich nur noch editorielle Änderungen vorgenommen werden dürfen, feststeht. Zum Schluss einigt man sich auf den internationalen Standard (International Standard – IS). Mehr Informationen zu diesem

<sup>3</sup>Als steuernde Instanz kommen, je nach Art des zu übermittelnden Steuersignals, mehrere Rollen im sich wandelnden Energiemarkt in Frage, wie bspw. ein Verteilnetzbetreiber oder ein lokal angesiedelter Aggregator, welcher den Ladevorgang mehrerer Elektrofahrzeuge steuert.

Tabelle 2.1: Dokumentenstruktur des ISO/IEC 15118 Standards und entsprechende (geplante) Stadien

Konduktives Laden			
Teil	Titel	Aktuelles Stadium	Planung
1	General information and use case definition	IS (04/13)	–
2	Network and application protocol requirements	IS (04/14)	–
3	Physical layer and data link layer requirements	FDIS (04/14)	IS (11/14)
4	Network and application protocol conformance test	CD (03/14)	DIS (10/14)
5	Physical layer and data link layer conformance test	NWIP (06/12)	CD (07/14)

Induktives Laden			
Teil	Titel	Aktuelles Stadium	Planung
6	General information and use case definition for wireless communication	CD (04/14)	DIS (11/14)
7	Network and application protocol requirements for wireless communication	NWIP (01/14)	CD (07/14)
8	Physical layer and data link layer requirements for wireless communication	NWIP (12/13)	CD (11/14)

Prozess können [19] entnommen werden. Jede Stufe darf entsprechend dem ISO-Reglement nur eine bestimmte Zeitspanne einnehmen, bis die nächste Stufe erreicht sein muss, ansonsten wird der Standardisierungsprozess gestoppt.

Die Spezifikationen bezüglich des induktiven Ladens bauen auf den Vorarbeiten zum konduktiven Laden auf und erweitern diese um spezifische Anwendungsfälle und technische Anforderungen, die für die drahtlose Energie- und Informationsübertragung vonnöten sind.

Diese Arbeit bezieht sich auf das konduktive Laden und hierbei vor allem auf Teil 2 dieses Standards, da dieses Dokument die relevanten Nachrichten, Datenformate und Parameter definiert, welche zwischen Elektroauto und Ladestation auszutauschen sind und die energierelevanten Mehrwertinformationen enthalten, deren Verarbeitung ein sinnvolles Lastmanagement überhaupt erst durchführen lässt. In Abbildung 2.9 werden die Teile 1 bis 3 der ISO/IEC 15118 Norm sowie eine Zuordnung der in Teil 2 eingesetzten Protokolle zu den ISO/OSI Schichten dargestellt. Hier kommt das Referenzmodell für Netzwerkprotokolle als Schichtenarchitektur zum Einsatz, nach dem eine jeweils obere Schicht die Dienste der unteren Schicht nutzt.

ISO/IEC 15118-3 definiert hiernach die Powerline-basierte Verbindung zwischen E-Fahrzeug und Ladestation über die beiden untersten Schichten des 7-Schichten-Modells (Physical Layer und Data Link Layer). Konkret wird die Datenverbindung über den HomePlug Green PHY Standard [31] realisiert, was eine separate physische Verbindung für die Datenübertragung überflüssig macht. Mithilfe der Powerline-Technologie wird das Ladekabel zur Übertragung der Datensignale genutzt, indem die Signale auf die Ladeverbindung (über den CP-Pin) aufmoduliert werden. Hierfür müssen sowohl das Elektroauto als auch die Ladestation ein entsprechendes Green PHY Modul besitzen.

Die weitere Kommunikation von der Netzwerkschicht (Schicht 3) bis hin zur Applikationsschicht (Schicht 7) wird über die ISO/IEC 15118-2 spezifiziert. Wie bereits erwähnt, basiert

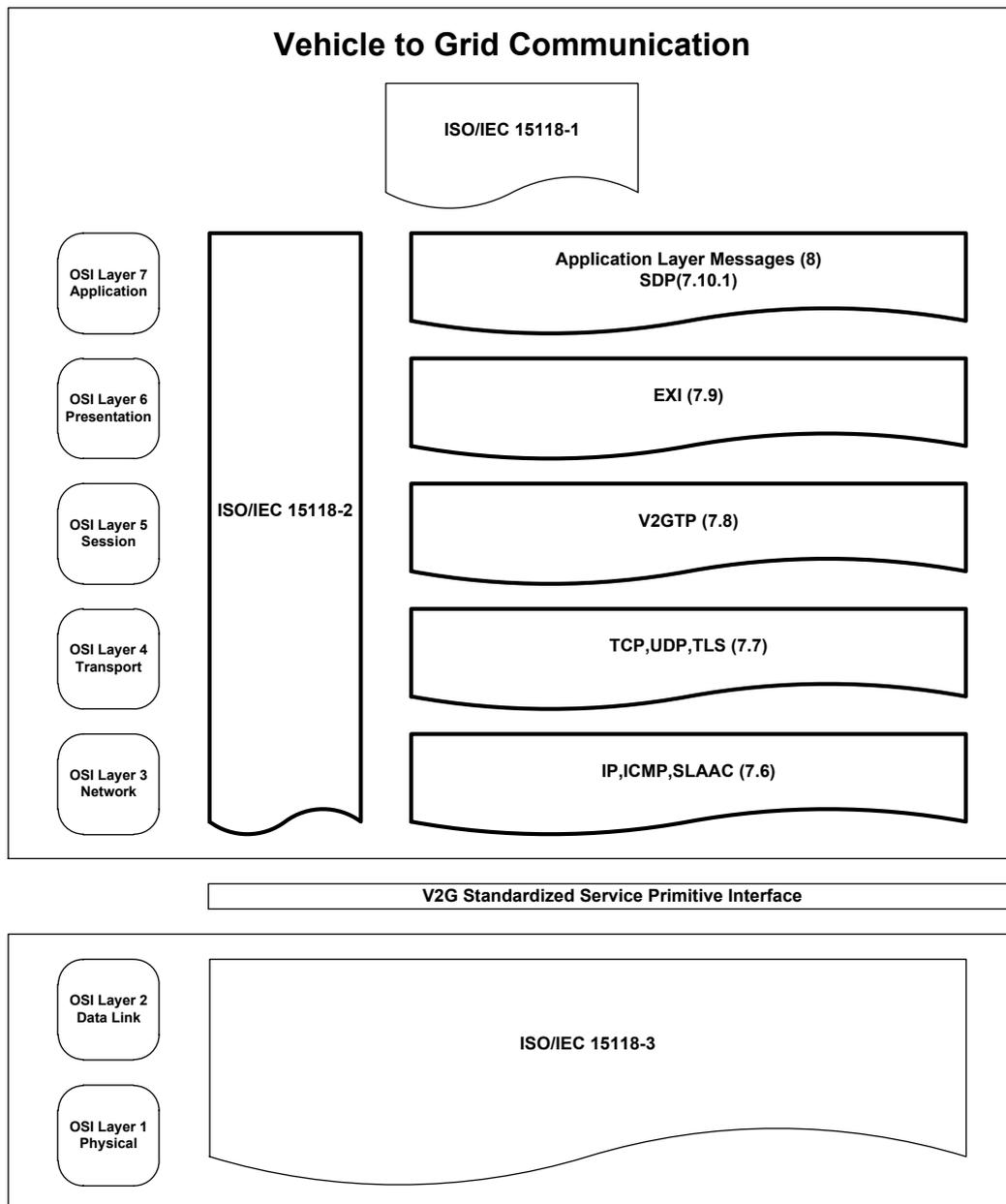


Abbildung 2.9: Abbildung der Teile 2 und 3 des ISO/IEC 15118 Standards sowie der verwendeten Protokolle auf die ISO/OSI-Schichten [39]

die Kommunikation zwischen EV und EVSE auf dem bewährten Internetprotokoll (IP), über welches sowohl Datagramm-Pakete mittels UDP ausgetauscht als auch eine zustandsbehaftete Kommunikation über TCP oder gar den abgesicherten TLS-Kanal durchgeführt werden kann. Eine Kommunikationssession wird mittels des in Teil 2 definierten Vehicle-to-Grid Transfer Protocol (V2GTP) aufgebaut, welches unter anderem eine Session-ID im Header einer jeden Nachricht transportiert und somit Zustandsinformationen einer Session zuordnen und Konsistenzprüfungen durchführen lässt.

Da dieser Kommunikationsstandard in eingebetteten Systemen zum Einsatz kommt, in

welchen stets auf einen geringen Speicherplatzverbrauch sowie eine niedrige Rechenleistung geachtet werden muss, ist die Größe der auszutauschenden Nachrichten ein wichtiger Faktor. Sämtliche Nachrichten sind in einem XML-Format definiert und müssen entsprechend gegen ein XML-Schema validiert werden. Eine Nachricht basierend auf XML ist zwar maschinenlesbar, enthält jedoch auch Metainformationen, welche die Nachricht wiederum aufblähen. Um eine effiziente Kodierung und somit Daten-Kompression zu ermöglichen, kommt das vom World Wide Web Consortium (W3C) spezifizierte Format EXI (Efficient XML Interchange) für die binäre Repräsentation von XML-Nachrichten auf der Präsentationsschicht zum Einsatz. Die Verarbeitung der Informationen auf binärer Ebene erhöht die Geschwindigkeit und reduziert sogleich den benötigten Speicherplatz in der jeweiligen Kommunikationseinheit. EXI-Nachrichten können bis zu 100 Mal kleiner sein als deren XML-Äquivalent [73].

Die eigentlichen Nachrichten sowie deren Parameter und Datentypen werden in der sogenannten Applikationsschicht, der obersten der 7 Schichten, definiert und sind Gegenstand weiterer Untersuchung im Verlauf dieser Arbeit. ISO/IEC 15118-1 beschreibt die Anwendungsfälle, welche über die ISO/IEC 15118 abgedeckt werden und bildet somit den Rahmen für die Teile ISO/IEC 15118-2 bis ISO/IEC 15118-5.

Für eine erfolgreiche Verbreitung dieses Standards mit interoperablen Implementierungen ist es wichtig, eine Referenzimplementierung zur Verfügung zu haben, auf welche sich möglichst viele Interessensgruppen einigen und ihre eigene Implementierung dagegen testen können. Hierfür müssen Testfälle generiert werden, welche die korrekte Umsetzung der diversen Anforderungen, welche bspw. in Teil 2 und 3 für den induktiven Ladefall definiert wurden, für jede Implementierung überprüft. Dies ist Gegenstand der ISO/IEC 15118-4 und -5, wobei Teil 4 die Testfälle für Teil 2, und Teil 5 die Testfälle für Teil 3 definiert.

Das vom BMWi geförderte Projekt eNterop [67], an welchem die Partner Continental, Fraunhofer Gesellschaft, TU Dortmund, BMW, VW, Daimler, RWE und Siemens beteiligt sind, hat das Ziel, gemäß der Teile 4 und 5 automatisierbare Testabläufe in Software und Hardware zu realisieren. Aufgrund der breit aufgestellten Partner aus den Bereichen Automobilindustrie, Energieversorger und Ladeinfrastrukturhersteller stehen die Chancen für die Akzeptanz einer durch das Projekt zu etablierenden offenen Referenzplattform, welche die Interoperabilität zwischen diversen Implementierungen sicherstellen soll, somit gut.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels soll nun auf die konkreten Nachrichten eingegangen werden, auf Basis derer die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation gemäß ISO/IEC 15118-2 stattfindet. Die Erläuterung dieser Nachrichten bildet einen wichtigen Grundstein für das Kapitel 4, in welchem deren Verwendung anhand eines realen Szenarios illustriert wird.

### **Der Kommunikationsfluss zwischen EV und EVSE im Allgemeinen**

Das Kommunikationsprotokoll ist gemäß eines Client/Server-Schemas aufgebaut. Die Kommunikationseinheit im Elektrofahrzeug – fortan auch mit *Electric Vehicle Communication Controller (EVCC)* bezeichnet – stellt stets eine Anfrage, auf welche die Kommunikationseinheit in der Ladestation – *Supply Equipment Communication Controller (SECC)* – innerhalb eines je Nachricht definierten Timeouts antworten muss. Anfragenachrichten werden im weiteren Verlauf der Arbeit auch mit „Request“ (kurz Req), Antwortnachrichten mit „Response“ (kurz Res) bezeichnet. Wird ein Timeout ausgelöst, so wird die Ladekommunikation abgebrochen und kann erneut vom EV initialisiert werden. Die Nutzung des bereits erwähnten EXI-Formats erlaubt relativ kleine Timeout-Werte, die je nach Nachricht zwischen 2 und 5

Sekunden liegen, innerhalb derer eine Antwort auf eine Anfrage eintreffen muss. Darüber hinaus dürfen nie mehr als 60 Sekunden zwischen zwei aufeinander folgenden Anfragen vergehen, sonst wird ebenfalls ein Timeout ausgelöst, außer es handelt sich um die letzte Nachricht `SessionStopReq`, welche die Kommunikationssession gänzlich beendet.

Abbildung 2.10 illustriert alle Request-Response Nachrichtenpaare für den Fall des Wechselstromladens im „Plug-and-Charge“ (PnC) Identifizierungsmodus. Beim PnC-Szenario muss der Elektromobilist lediglich das Ladekabel in Fahrzeug und Ladestation einstecken und alle Aspekte der Authentifizierung, Autorisierung, Abrechnung sowie Ladesteuerung werden automatisiert im Hintergrund abgewickelt, ohne dass eine weitere Interaktion des Nutzers vonnöten ist. Dieser Automatismus basiert auf den Informationen eines Vertrages zwischen Kunde und E-Mobilitäts-Anbieter, welcher im EVCC abgespeichert ist. Der alternative Identifizierungsmodus gemäß ISO/IEC 15118 wird „External Identification Means“ (EIM) genannt, worunter die externe Authentifizierung und Autorisierung mittels einer RFID-Karte, Direktbezahlssystemen oder SMS subsumiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus auf den benutzerfreundlicheren und technologisch interessanteren PnC-Modus gelegt, dessen Identifizierungsprozess mittels Zertifikaten und kryptographischen Methoden in Kapitel 5 erläutert wird. Der Nachrichtenaustausch beim Gleichstromladen variiert nur marginal, die Parameter, welche für eine flexible Lastkontrolle ausgetauscht werden müssen, sind im AC- wie im DC-Fall gleich.

Die Sequenz des Nachrichtenaustauschs kann in mehrere Bereiche semantisch unterteilt werden, welche im Folgenden detailliert Erläuterung finden.

### Aufbau der IP-basierten Kommunikation

Die Kommunikation zwischen EVCC und SECC wird mit dem `SECC Discovery Protocol` (SDP) initiiert. Auf Basis einer UDP-Verbindung bringt somit der EVCC mittels des SDP die IP-Adresse sowie die Portnummer des SECC in Erfahrung und überprüft, ob beide Seiten eine abgesicherte Kommunikation über TLS (Transport Layer Security) unterstützen oder ob fortan über eine TCP-Verbindung (Transmission Control Protocol) kommuniziert werden soll.

Sobald die IP-basierte Verbindung über eine Powerline-Kommunikation mittels des CP-Pins im Typ 2 Ladekabel aufgebaut worden ist, initiiert der EVCC eine Protokoll-Handshake-Sequenz durch das Senden einer `supportedAppProtocolReq`-Nachricht, um sich mit dem SECC auf eine Protokollversion der ISO/IEC 15118 zu einigen. Selbst während des Standardisierungsprozesses entstanden verschiedene Protokollstadien (DIS, FDIS und IS).

Sobald sich EVCC und SECC auf eine Protokollversion geeinigt haben, wird eine `SessionSetupReq`-Nachricht gesendet, um eine sogenannte V2G (Vehicle-to-grid) Kommunikationssession aufzubauen. Hierbei wird eine Session-ID ausgelotet, welche alle fortlaufenden Nachrichten ebendieser Session in ihrem Header führen müssen, damit auszutauschende Nachrichten jener Session zugeordnet werden können und Zustandsinformationen über eine Ladepause hinweg gehalten werden können. Abbildung 2.11 illustriert den Zusammenhang zwischen einer Session und mehreren Ladevorgängen. Falls das Elektrofahrzeug eine Ladepause einlegen sollte, so wird jegliche Kommunikation über alle Protokollschichten hinweg beendet und das Kommunikationsmodul EVCC abgeschaltet, um Energie zu sparen. Wenige Zustandsinformationen müssen hierbei gespeichert werden und können bei der Initialisierung einer neuen Kommunikationssession durch die Session-ID, welche zuvor ausgehandelt wurde, wiederverwendet werden. Eine Ladesession („Charging Session“), die pausiert wurde, kann sich somit über mehrere V2G Kommunikationssessions erstrecken.

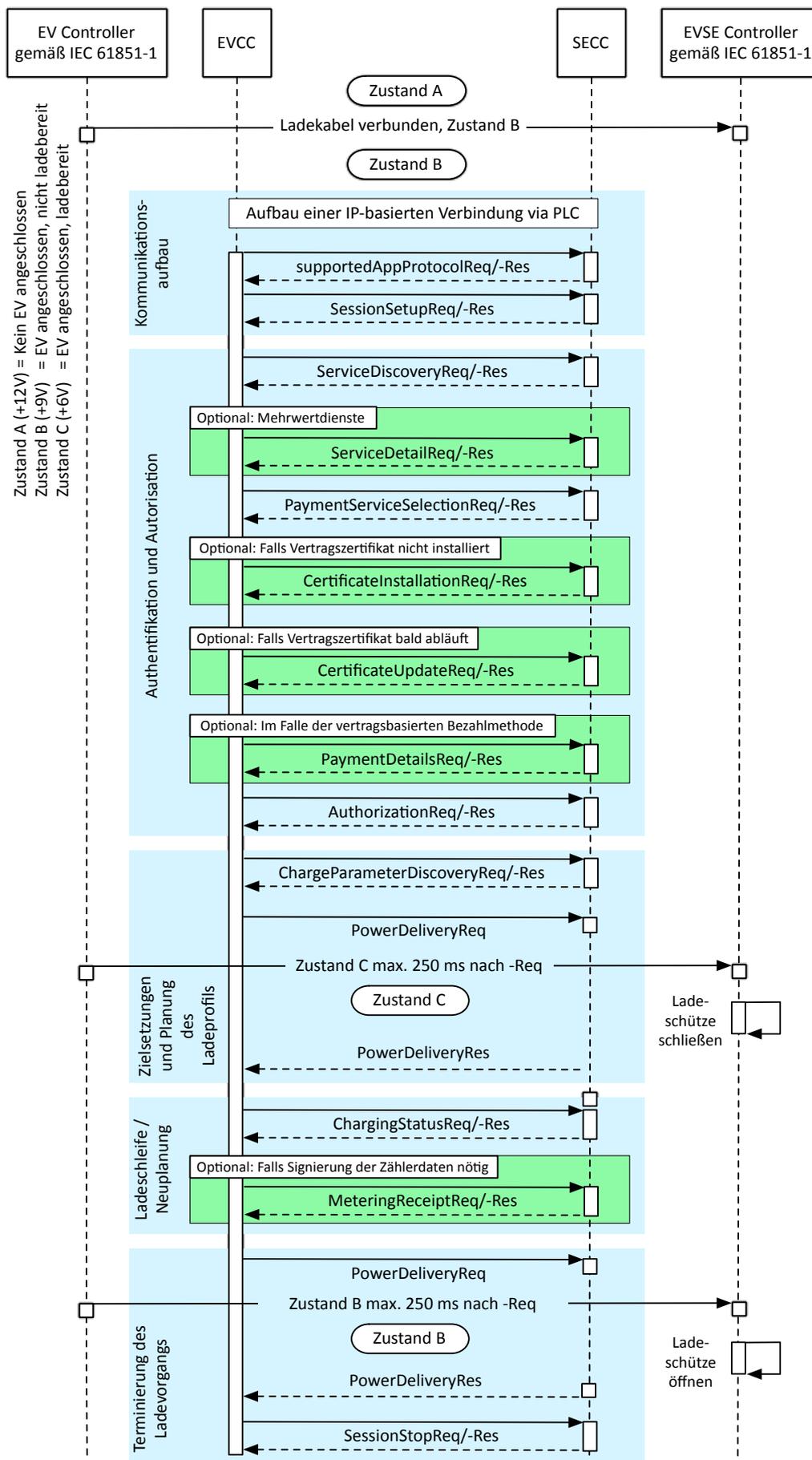


Abbildung 2.10: Request-Response Nachrichtenpaare im PnC-Modus und Wechselstrom-Ladeszenario

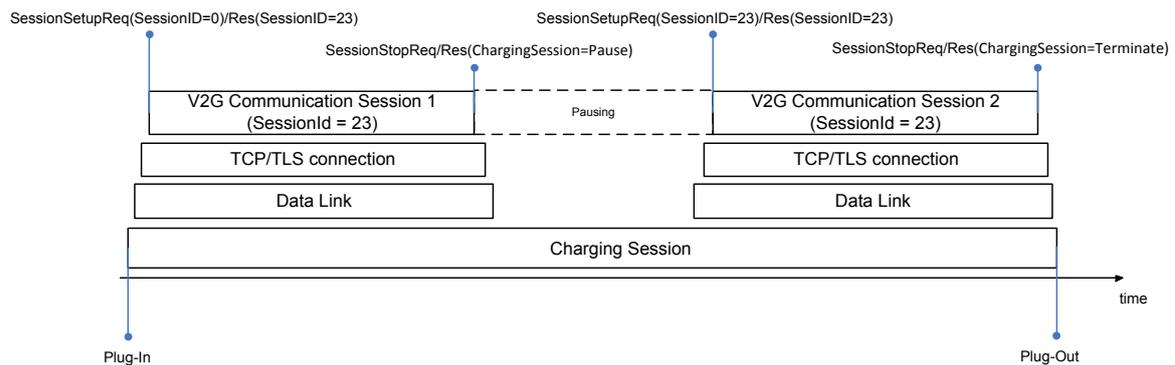


Abbildung 2.11: Session-Handling gemäß der ISO/IEC 15118-2 Spezifikation [39]

### Authentifizierung und Autorisierung

Nachdem eine V2G Kommunikationssession aufgebaut worden ist, fordert der EVCC in der **ServiceDiscoveryReq** den SECC dazu auf, alle offerierten Dienste aufzulisten, wobei mittels eines optionalen Filters in der Anfragenachricht spezifisch nur nach den Diensten gefragt werden kann, welche auch vom Elektrofahrzeug unterstützt werden. Das ISO/IEC 15118-2 Dokument beschreibt lediglich die für den Ladeprozess relevanten Dienstekategorien. Hierzu zählen die diversen Ladedienste an sich (ein-/dreiphasiges AC-Laden oder DC-Laden), ein Installations- bzw. Aktualisierungsdienst für Vertragszertifikate sowie ein Dienst für die Nutzung der Standardprotokolle FTP, HTTP oder HTTPS, über welche weitere Mehrwertdienste angeboten werden können. Zusätzlich erlaubt die Spezifikation, weitere (momentan noch nicht absehbare) Mehrwertdienste zu definieren und bietet somit eine gewisse Zukunftssicherheit und Flexibilität.

Nachdem der SECC in der **ServiceDiscoveryRes** die zur Verfügung stehenden Dienste sowie die möglichen Bezahloptionen **Contract** (vertragsbasiertes PnC-Ladeszenario) und **ExternalPayment** (EIM) kommuniziert hat, kann das Elektrofahrzeug für alle Dienste, die es in Anspruch nehmen möchte, mittels des **ServiceDetailReq/-Res** Nachrichtenpaars weitere Details und Parameter erfragen. Die Entscheidung des EVCC für eine Bezahlungsmethode sowie die in Anspruch zu nehmenden Dienste werden mittels des **PaymentServiceSelectionReq/-Res** Nachrichtenpaars übermittelt.

Die optionalen Nachrichtenpaare **CertificateInstallationReq** und **-Res** sowie **CertificateUpdateReq** und **-Res** werden im Falle der Bezahloption **Contract** genutzt, falls kein valides Vertragszertifikat im EVCC installiert ist, welches die Autorisierung des Ladevorgangs erlauben würde. Weitere Informationen bzgl. des Zertifikatsaustauschs und des Fahrstromvertrags können Kapitel 5 entnommen werden.

Im Falle der vertragsbasierten Identifikation und Bezahlungsmethode kann mittels den optionalen **PaymentDetailsReq** und **-Res** Nachrichten – neben der Zertifikatskette und anderen kryptographischen Parametern – der sogenannte e-Mobility Account Identifier (EMAID)<sup>4</sup> übertragen werden. Diese ID identifiziert einen Fahrstromvertrag, welcher zwischen dem Elektromobilisten und seinem E-Mobilitäts-Anbieter geschlossen wurde und hat folgende Struktur:

$$\langle \text{EMAID} \rangle = \langle \text{Country Code} \rangle \langle \text{S} \rangle \langle \text{Provider ID} \rangle \langle \text{S} \rangle \langle \text{eMA Instance} \rangle \langle \text{S} \rangle \langle \text{Check Digit} \rangle$$

<sup>4</sup>Die eMAID basiert auf der DIN SPEC 91286 [18].

Zwei alphanumerische Zeichen für die Länderkennung (z. B. DE für Deutschland) werden gefolgt von drei alphanumerischen Zeichen für die Provider ID, welche bspw. ein Energieversorgungsunternehmen identifiziert, und neun weiteren für die eMA Instanz, welche als vom Provider vergebene Vertragsnummer bezeichnet werden kann. Während die Provider ID von einer zentralen Instanz vergeben werden muss, obliegt die Wahl einer eMA Instance der freien Entscheidung eines Elektromobilitäts-Anbieters (Providers)<sup>5</sup>. In Deutschland ist bspw. der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) seit 1. März 2014 für die Vergabe der Provider IDs zuständig [9]. Eine optionale Prüfsumme schließt die EMAID ab. Das <S> steht für den optionalen Separator „-“. Ein Beispiel für eine gültige EMAID wäre DE8AA1A2B3C4D59 bzw. DE-8AA-1A2B3C4D5-9.

Als letzten Schritt der Authentifizierungs- und Autorisierungsphase werden die obligatorischen `AuthorizationReq` und `-Res` Nachrichten ausgetauscht, in welchen schließlich die übermittelten Identifizierungsdaten mit kryptographischen Methoden verifiziert werden.

### Zielsetzungen und Planung des Ladeprofils

Nachdem das E-Fahrzeug bei der Ladestation für den Ladeprozess autorisiert wurde, beginnen EVCC und SECC, sich gegenseitig ihre jeweiligen Ladeparameter mittels des `ChargeParameterDiscoveryReq/-Res` Nachrichtenpaars mitzuteilen.

In der `ChargeParameterDiscoveryReq`-Nachricht werden unter anderem folgende energie-relevanten Mehrwertinformationen übertragen:

- Benutzerdefinierter Abfahrtszeitpunkt (`DepartureTime`)
- Benötigte Energiemenge (`EAmount`)
- Maximale Nennspannung, gemessen zwischen einer Phase und Neutraleiter (`EVMaxVoltage`)
- Maximaler Ladestrom pro Phase (`EVMaxCurrent`)
- Minimaler Ladestrom pro Phase (`EVMinCurrent`)

In Abschnitt 4.2 wird erläutert, wie genau diese Parameter in der optimierten Einplanung des E-Fahrzeugs als flexibler Verbraucher und Energiespeicher Verwendung finden und in welcher Weise die `ChargeParameterDiscoveryReq`-Nachricht um wertvolle Parameter standardkonform erweitert werden kann. Die benötigte Energiemenge ist als Gesamtenergiemenge zu verstehen, welche neben der nötigen Energie für die Vollladung der Batterie auch die Energie der Nebenverbraucher (Aufwärmen der Batterie bei Unterschreitung einer Mindesttemperatur im Winter, Beheizung oder Klimatisierung des Innenraums) berücksichtigt.

Die `ChargeParameterDiscoveryRes`-Nachricht des SECC wiederum kommuniziert die netzseitig restriktiven Ladeparameter. Neben technischen Restriktionen wie dem ladestationsseitig maximal erlaubten Ladestrom pro Phase und der anliegenden Nennspannung wird darüber hinaus ein sehr verschachtelter Parameter namens `SASchedules` übermittelt. Grundsätzlich besteht dieser Parameter aus einem obligatorischen `PMaxSchedule` und einem optionalen `SalesTariff`. Ersteres beschreibt eine *nicht zu überschreitende Lastkurve*, gegeben als Funktion über die Zeit mit Leistungswerten pro Zeitintervall, bei deren Überschreitung der SECC den Ladevorgang abbricht. Mit Hilfe einer solchen Lastkurve kann ein Verteilnetzbetreiber oder eine beliebige andere steuernd einwirkende Instanz – wie bspw. das Energiemanagement-System

---

<sup>5</sup>Als Elektromobilitäts-Anbieter ist bspw. ein Energievertrieb, welcher dedizierte Ladestromverträge für das Aufladen von Elektrofahrzeugen an öffentlichen Ladestationen anbietet, oder auch ein Betreiber von Ladestationen zu verstehen.

eines Smart Home (siehe Abschnitt 3.2) – eine dynamische netzbedingte Engpasssituation über das Protokoll dem Fahrzeug mitteilen. Ist keine netzseitige Restriktion vorhanden, so basiert `PMaxSchedule` lediglich auf den statischen Limitierungen, die durch die Ladestation an sich sowie das Ladekabel vorgegeben sind. Auf den Parameter `PMaxSchedule` wird in Abschnitt 4.3.3 im Rahmen einer formalen Darstellung des Optimierungsproblems näher eingegangen.

Der optionale `SalesTariff` zielt darauf ab, dem EVCC auf Basis von relativen Kosteninformationen (Preislevels statt absolute Preise, oder prozentueller Anteil der CO<sub>2</sub> Emissionen) einen tariflichen Anreiz zu bieten, das resultierende Lastprofil des Elektrofahrzeugs in eine gewünschte Richtung hin zu beeinflussen. Die Kosteninformation kann sowohl als Kosten pro Zeit als auch Kosten pro bezogener Energie oder gar Leistungsstufe angegeben werden.

Beide Parameter sollen das Elektrofahrzeug hinsichtlich seines Lastprofils beeinflussen, was auf den ersten Blick die Frage aufwirft, warum man überhaupt einen tariflichen Anreiz nutzen sollte, wenn man doch mit einer Lastbegrenzungskurve das Fahrzeug direkter steuern kann. Die ursprüngliche Idee hinter der Einführung dieser beiden Parameter ist folgende: `PMaxSchedule` soll die *statischen Limits*, gegeben durch die technischen Gegebenheiten der Ladestation und des Ladekabels, sowie eine *dynamische und kritische Überlastsituation* im Netz reflektieren, die keinesfalls überschritten, aber durchaus unterschritten werden darf. Die Ausnutzung der resultierenden Fläche unterhalb von `PMaxSchedule` soll durch ein zeit- oder lastvariables Preissignal beeinflusst werden. Auf diese Weise soll der SECC den EVCC dazu anregen – nicht zwingen – bspw. in Zeiten eines Überschusses an Windenergie im Netz mehr Energie abzurufen als in Spitzenlastzeiten. In letzter Instanz liegt die Entscheidungsgewalt über den durchzuführenden Ladeverlauf beim *Batterie-Management-System (BMS)* (mehr hierzu im Abschnitt 4.3.6) einerseits, welches über den sicheren Betrieb der Batterie wacht, und dem EVCC andererseits, welcher versucht, den Ladevorgang für den Fahrzeugnutzer möglichst günstig durchzuführen. Dies bedeutet, dass gegebenenfalls die vorgegebene Lastkurve in Form des `PMaxSchedule` vom E-Fahrzeug nicht gänzlich ausgereizt und somit weniger Energie als geplant abgerufen wird. Der `SalesTariff` ist gegeben als Funktion über die Zeit, wobei im Gegensatz zu `PMaxSchedule` nicht Leistungswerte pro Zeitintervall, sondern relative Preisinformationen pro Zeitintervall übertragen werden.

Nachdem nun das vom SECC vorgeschlagene Lastprofil vom EVCC empfangen wurde, wird das BMS eine Plausibilitätsprüfung durchführen und gegebenenfalls das Lastprofil entsprechend beeinflussen. Das vom EVCC akzeptierte Lastprofil wird in der folgenden `PowerDeliveryReq`-Nachricht dem SECC übermittelt, woraufhin dieser die Ladestation dazu veranlasst, die Ladeschütze zu schließen, damit schlussendlich Spannung anliegt und Strom fließen kann. Das Senden von `PowerDeliveryReq` geht mit dem Zustandsübergang von Zustand B zu Zustand C einher, wie auch Abbildung 2.10 zu entnehmen ist.

Der Parameter `ChargeProgress`, welcher in der `PowerDeliveryReq`-Nachricht enthalten ist, kann folgende drei Enumerationswerte annehmen, die den Ladeverlauf beeinflussen:

- **Start:** Sofortiger Start des Ladeprozesses
- **Renegotiate:** Der EVCC möchte eine Neuaushandlung des Lastprofils durchführen, welche mit dem Senden einer neuen `ChargeParameterDiscoveryReq`-Nachricht eingeleitet wird. Diese Entscheidung wurde üblicherweise durch den SECC in einer vorigen Antwort veranlasst.
- **Stop:** Der Ladevorgang soll verzögert starten oder gar gänzlich gestoppt werden. Die Information darüber, ob nur eine Pausierung stattfindet, findet sich in der letzten

Nachricht `SessionStopReq`.

Die `PowerDeliveryRes`-Nachricht beinhaltet lediglich einen sogenannten `ResponseCode` (wie jede andere Antwort auch) sowie einen `EVSEStatus` (ein Parameter, welcher zum Ende dieses Abschnitts näher erläutert wird).

### Ladeschleife und Neuaushandlung des Ladeprofils

Mit dem Austausch der `PowerDeliveryReq`- und `-Res`-Nachricht sowie dem auf `Start` gesetzten Parameter `ChargeProgress` beginnt der eigentliche Ladevorgang, bei dem Energie übertragen wird. Bis die Batterie vollgeladen ist, eine Neuverhandlung durch den SECC angestoßen wird oder der Fahrzeugnutzer manuell einen Ladestopp initiiert, wird nun für die Dauer der folgenden Ladeschleife das ausgehandelte Lastprofil abgearbeitet.

Das `ChargingStatusReq/-Res` Nachrichtenpaar erlaubt Plausibilitätsprüfungen der regelmäßig vom SECC übermittelten Zählerdaten, welche eine Bilanz der bezogenen Energiemenge darstellen. Der SECC kann den EVCC dazu auffordern, die Zählerdaten zu signieren, welche in der `ChargingStatusRes`-Nachricht enthalten sind, was den Austausch eines optionalen `MeteringReceiptReq/-Res` Nachrichtenpaars nach sich zieht. Diese signierten Zählerdaten können sodann für Abrechnungszwecke genutzt werden, für den Fall, dass dies in manchen Ländern regulatorisch vorgeschrieben wird.

### Terminierung des Ladevorgangs

Sobald der Ladevorgang beendet werden soll, wird eine erneute `PowerDeliveryReq`-Nachricht von EVCC an SECC mit `ChargeProgress = Stop` gesendet, welche die Ladestation dazu anleiten wird, die Ladeschütze wieder zu öffnen und somit den Energiefluss zu stoppen. Dieser Vorgang wird mittels der `PowerDeliveryRes`-Nachricht bestätigt. Schlussendlich wird der SECC mit der `SessionStopReq`-Nachricht und dem darin enthaltenen Parameter `ChargingSession` darüber informiert, ob der Ladevorgang nur pausiert (`Pause`) oder gänzlich beendet (`Terminate`) werden soll.

### ResponseCodes und EVSEStatus

Jede Response-Nachricht übermittelt einen `ResponseCode`, wobei im positiven Fall meist mit OK geantwortet wird und im negativen Fall die `ResponseCodes` sich nachrichtenspezifisch unterscheiden, um dem EVCC mehr Informationen über den Grund eines Abbruchs der Kommunikationssession zu liefern.

Des Weiteren enthalten die folgenden Antwort-Nachrichten zusätzlich den wichtigen Parameter `EVSEStatus`, welcher dem SECC erlaubt, das Verhalten des EVCC zu beeinflussen:

- `ChargingStatusRes`
- `MeteringReceiptRes`
- `PowerDeliveryRes`

Dieser verschachtelte Parameter enthält u. a. den Parameter `EVSENotification`, welcher einen der selbsterklärenden Werte `None`, `StopCharging`, oder `ReNegotiation` annehmen kann. Die jeweils geforderte Aktion muss innerhalb einer Zeitspanne erfolgen, die durch den ebenfalls in `EVSEStatus` enthaltenen Parameter `NotificationMaxDelay` vorgegeben wird. Auf diese Weise ist es der Ladestation möglich, dynamisch auf unvorhergesehene Netzsituationen zu reagieren und den Ladevorgang durch eine Neuverhandlung des Ladefahrplans daran anzupassen.

Somit ist ein kompletter Ladevorgang eines Elektrofahrzeugs, welches mit einer Ladestation über das Protokoll ISO/IEC 15118 kommuniziert, beschrieben.

Wie bereits erwähnt, definiert die ISO/IEC 15118 nur die Kommunikation zwischen einem Elektrofahrzeug und einer Ladestation. Der Kommunikationsfluss zwischen einzelnen Ladestationen und einer darüber liegenden zentralen Managementinstanz, sei es ein Flottenenergiemanagementsystem, ein Verteilnetzbetreiber oder ein E-Mobilitäts-Anbieter jeglicher Art, wird im *Open Charge Point Protocol (OCPP)* spezifiziert, auf welches im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

### 2.2.2 Open Charge Point Protocol (OCPP)

Das Open Charge Point Protocol ist kein offizieller internationaler Standard, sondern ein offener de facto Standard, welcher vom niederländischen E-laad Konsortium ins Leben gerufen wurde. Die aktuelle OCPP 2.0 RC 1 Spezifikation<sup>6</sup> [54] ist abwärtskompatibel zur weitverbreiteten Vorgängerversion 1.5 und bewahrt somit deren Funktionalität, erweitert sie jedoch um dringend benötigte neue Funktionen, welche die Preisgestaltung von Ladevorgängen, ein gesteuertes Laden basierend auf energierelevanten Mehrwertinformationen und verbesserte Wartungsmöglichkeiten einer Ladestation ermöglichen. Schaut man sich den aktuellen Stand der Spezifikation dieses auf Webservices basierten Protokolls an, so fällt auf, dass viele der für das gesteuerte Laden nötigen Parameter aus der ISO/IEC 15118 Norm übernommen wurden. Das verdeutlicht das enge Zusammenspiel zwischen diesen beiden Kommunikationsprotokollen und signalisiert einen weiteren wichtigen Schritt in Richtung interoperabler und standardisierter E-Mobilitätslösungen. Mittlerweile hat sich OCPP zu einer europaweiten Initiative entwickelt und wurde sogar bereits in mehreren ähnlichen Initiativen auch außerhalb Europas adaptiert [47].

Für das weitere Verständnis dieser Arbeit sind tiefergehende Details zu diesem Kommunikationsprotokoll nicht vonnöten und finden daher keine detaillierte Betrachtung.

### 2.2.3 IEC 61850

Die IEC 61850 Norm, betitelt mit „Communication networks and systems in substations“, beschreibt ein Übertragungsprotokoll für die Schutz- und Leittechnik und hat sich als Kommunikationsstandard im Markt der Automatisierung von Schaltanlagen etabliert. Insbesondere dezentrale Energieerzeugungsanlagen, wie PV-Anlagen oder BHKWs, können hierüber gesteuert werden. In der aktuellen Literatur werden Erweiterungen dieser Norm diskutiert, mit Hilfe derer die Einbindung von Elektrofahrzeugen in das Smart Grid über die Steuerung von Ladestationen ermöglicht werden soll. Dieser Ansatz wird bspw. im EU-Forschungsprojekt SmartV2G verfolgt<sup>7</sup> und wurde ebenfalls bereits von Schmutzler et al. [62] [60] untersucht. Somit bildet diese Norm eine mögliche Alternative zur Kommunikation von Steuersignalen an Ladestationen, welche im Niederspannungsnetz angesiedelt sind. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird dieser Standard jedoch nicht näher betrachtet.

---

<sup>6</sup>Die finale Spezifikation wird für das dritte Quartal 2014 erwartet und im Rahmen der Open Charge Alliance (<http://www.openchargealliance.org>), einer Nachfolgeorganisation des OCPP Forums, vorangetrieben.

<sup>7</sup><http://www.esk.fraunhofer.de/de/medien/pressemitteilungen/pm1402.html>

#### **2.2.4 Die SAE Normenfamilie für intelligentes Laden**

Die ISO/IEC 15118 Norm ist nicht das einzige in der Entwicklung befindliche digitale Kommunikationsprotokoll für das gesteuerte Laden von Elektrofahrzeugen. Der US-amerikanische Automobilverband Society of Automotive Engineers (SAE) startete im Jahre 2008 eine Arbeitsgruppe zur Entwicklung der SAE J2847, eine Reihe von empfohlenen Anwendungsregeln, welche u. a. die Kommunikation zwischen Plug-in Fahrzeugen und dem öffentlichen Stromnetz (SAE J2847/1-3) definiert. Diese SAE-Dokumente zielen auf die direkte Kommunikation zwischen E-Fahrzeug und dem "Netz" ab – ein Platzhalter für eine Gruppe von Entitäten wie bspw. der Energielieferant, der Netzbetreiber, ein Aggregator oder sonstige Energiedienstleister. Dies steht beispielhaft für die unterschiedlichen Ansätze in den USA und in Europa, wonach im Gegensatz zu Europa in den USA der direkte Steuerungszugriff einer Netz-Entität auf die Endgeräte gemäß des Smart Energy Profile 2.0 (SEP 2.0) vorangetrieben wird, um eine Laststeuerung durchzuführen. Die ISO/IEC 15118 Norm hingegen spezifiziert gezielt die direkte Kommunikation zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation.

Es gibt bereits Bestrebungen, die teils parallelen Entwicklungen aus SAE J2847 und ISO/IEC 15118 zusammenzuführen und kompatibel zueinander zu gestalten. Die Spezifikationen bezüglich der aktiven Ladesteuerung, der Neuaushandlung des Lastprofils, der automatisierten Abrechnung sowie zusätzlicher Mehrwertdienste scheinen in der ISO/IEC 15118 Norm jedoch weiter vorangeschritten und ausgereifter zu sein, weshalb im weiteren Verlauf dieser Arbeit die SAE Normen keine weitere Betrachtung finden.

## KAPITEL 3

# VERSUCHSAUFBAU UND EVALUATIONSUMGEBUNG

Die beste Voraussetzung zur Hebung des Lastverschiebepotentials von Elektrofahrzeugen ist dort gegeben, wo diese Fahrzeuge lange mit der Ladestation verbunden sind, also im privaten Bereich zu Hause bzw. auf halb-öffentlichem Terrain wie dem Firmenparkplatz des Arbeitgebers. Um die Vorteile der Integration eines Elektrofahrzeugs in das Energienetz und dessen Eignung als mobilen Energiespeicher und Verbraucher real untersuchen zu können, wurde daher im Rahmen des Forschungsprojekts iZEUS<sup>1</sup> eine bereits bestehende Laborumgebung um hard- und softwaretechnische Komponenten erweitert. Dieser Versuchsaufbau stellt einen bereits im Elektromobilitätsforschungsprojekt MeRegioMobil<sup>2</sup> konzipierten und realisierten Prototypen eines intelligenten Haushalts mit beobachtbaren und steuerbaren Haushaltskomponenten dar, das *Energy Smart Home Lab (ESHL)*, dessen Grundriss Abbildung 3.1 zu entnehmen ist. Das ESHL sowie das im Einsatz befindliche *Energiemanagement-System (EMS)* wurde in [6] und [3] bereits ausführlich beschrieben. Es sollen an dieser Stelle daher nur die zum Verständnis dieser Arbeit notwendigen Grundlagen über den technischen Aufbau des ESHLs sowie die dem EMS zugrundeliegende Softwarearchitektur dargestellt werden.

### 3.1 Das Energy Smart Home Lab (ESHL)

Das Energy Smart Home Lab hat eine Grundfläche von ca. 60 m<sup>2</sup>. Diese ist aufgeteilt auf eine Wohnküche und zwei Schlafzimmer. Ein zusätzlicher Technikraum beherbergt z. B. die Messinstrumente, das  $\mu$ -Blockheizkraftwerk (BHKW)<sup>3</sup> für Heizung und Warmwasserbereitung, den Solarwechselrichter sowie das zentrale EMS. Das Haus ist sowohl mit elektrischen als auch thermischen Haushalts-Komponenten ausgestattet, welche sich einerseits aus herkömmlichen und andererseits aus intelligenten Haushaltsgeräten zusammensetzen, deren Intelligenz sich darüber definiert, dass sie ihren Zustand kommunizieren können und sich durch Steuersignale beeinflussen lassen. Beispiele für intelligente Haushaltsgeräte, die sich in der Durchführung ihrer Aufgabe sinnvoll beeinflussen lassen, sind eine Waschmaschine, ein Trockner, eine Geschirrspülmaschine oder eine Klimaanlage, die aus PCM-Kühlmodulen besteht. Unter einer

---

<sup>1</sup><http://izeus.kit.edu>

<sup>2</sup><http://meregiomobil.forschung.kit.edu>

<sup>3</sup>Ein Mikro-Blockheizkraftwerk ist eine Anlage zur Gewinnung elektrischer Energie und Wärme, welche hierfür das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung nutzt.

sinnvollen Beeinflussung ist hier zu verstehen, dass bspw. der Zeitpunkt des Programmstarts (bei einer Waschmaschine oder einem Trockner) oder der Betrieb des BHKW zur passenden Temperierung des Warmwasserspeichers zeitlich verschoben werden können, ohne dass dies Komforteinbußen für den Hausbewohner mit sich bringen würde. Hingegen ist bspw. ein zeitlich versetzter Betrieb der Herdplatte zur Zubereitung des Abendmahls für den Bewohner wenig bis nicht akzeptabel.

Neben solchen Verbrauchern sorgen Erzeuger, wie eine auf dem Dach installierte PV-Anlage mit 4,6 kWp und das bereits erwähnte Mikro-BHKW, für lokal regenerativ eingespeiste Energie.

Die Bewohner des Hauses erhalten eine detaillierte Übersicht über alle aktuellen und historischen Energieflüsse im Haus, den aktuell und für die nächsten 24 Stunden kommunizierten zeitvariablen Strompreis und die Lastgrenze<sup>4</sup> sowie weitere energierelevanten Daten mittels einer webbasierten Anwendung, dem *Energy Management Panel (EMP)* [10], auf welches sie über diverse installierte Touchscreen-Displays zugreifen können. Das EMP dient neben der Sensibilisierung des Benutzers hinsichtlich Stromverbrauch und Leistungsspitzen darüber hinaus als Benutzungsschnittstelle, um mit dem EMS zu interagieren. So kann die zeitliche Flexibilität der Bewohner bzgl. der Start- und Endzeitpunkte der intelligenten Haushaltsgeräte als auch bzgl. des Abfahrtszeitpunkts mit dem Elektroauto erschlossen werden. Der Nutzer kann z. B. auch festlegen, wie groß die gewünschte minimale Reichweite sein soll, die das Elektrofahrzeug für unvorhergesehene Fahrten stets vorhalten sollte. Dies hat direkte Auswirkung auf die zur Rückspeisung zur Verfügung stehende Energie und den Verlauf des Ladevorgangs. Basierend auf dem von extern kommunizierten Strompreis und Lastbegrenzungssignal sowie den Benutzerpräferenzen erfolgt eine automatisierte zeitliche Einplanung der Geräte durch das EMS, welche sich optimal auf die zu erfüllende Zielfunktion (bspw. kostenminimaler Stromverbrauch, Eigenstromoptimierung) auswirken soll.

Das im Projekt iZEUS zum Einsatz kommende Elektrofahrzeug ist ein Prototyp eines elektrifizierten Opel Meriva, dessen eingebaute Lithium-Ionen-Batterie eine Gesamtkapazität von 16 kWh aufweist, wovon jedoch nur ca. 12 kWh für das Fahren zur Verfügung stehen. Durch den speziell eingebauten Wechselrichter ist es in der Lage, Energie aus der Batterie auch wieder in das Netz bzw. das Smart Home mit einer maximalen Leistung von -4,2 kW zurückzuspeisen. Die maximale Ladeleistung beträgt 11 kW.

## 3.2 Das Energiemanagement-System (EMS) des ESHL

Das Energiemanagement-System, welches im Smart Home zum Einsatz kommt, hat die Aufgabe, sämtliche thermischen wie auch elektrischen Verbraucher zu beobachten. Basierend auf den beobachteten Zustandsinformationen, vom Benutzer über das EMP mitgeteilten Präferenzen sowie Preis- und Lastbegrenzungssignalen wird ein Gesamtlastprofil erzeugt, welches eine vorher definierte Zielfunktion erfüllt. Diese Zielfunktion kann beliebig definiert werden. So lässt sich bspw. festlegen, dass der vor Ort produzierte Strom aus regenerativen Energiequellen wie der Photovoltaik-Anlage auf dem Dach oder dem  $\mu$ -BHKW bestmöglich für die Deckung der eigenen Hauslast genutzt wird, anstatt die erzeugte Energie in das Netz einzuspeisen. Als weitere Zielfunktion könnte man sich vorstellen, die Gesamtstromkosten des Haushalts zu minimieren, indem man die steuerbaren Verbraucher zeitlich verschiebt. Diese Verschiebung basiert in diesem Fall auf einem Stromtarifsignal und einem Lastbegrenzungssignal, welches

---

<sup>4</sup>Diese Lastgrenze ist als eine weiche Grenze zu verstehen, deren Überschreitung nicht die harte Abschaltung von Verbrauchern zur Folge hat, sondern mit erheblichen Zusatzstromkosten einhergeht.

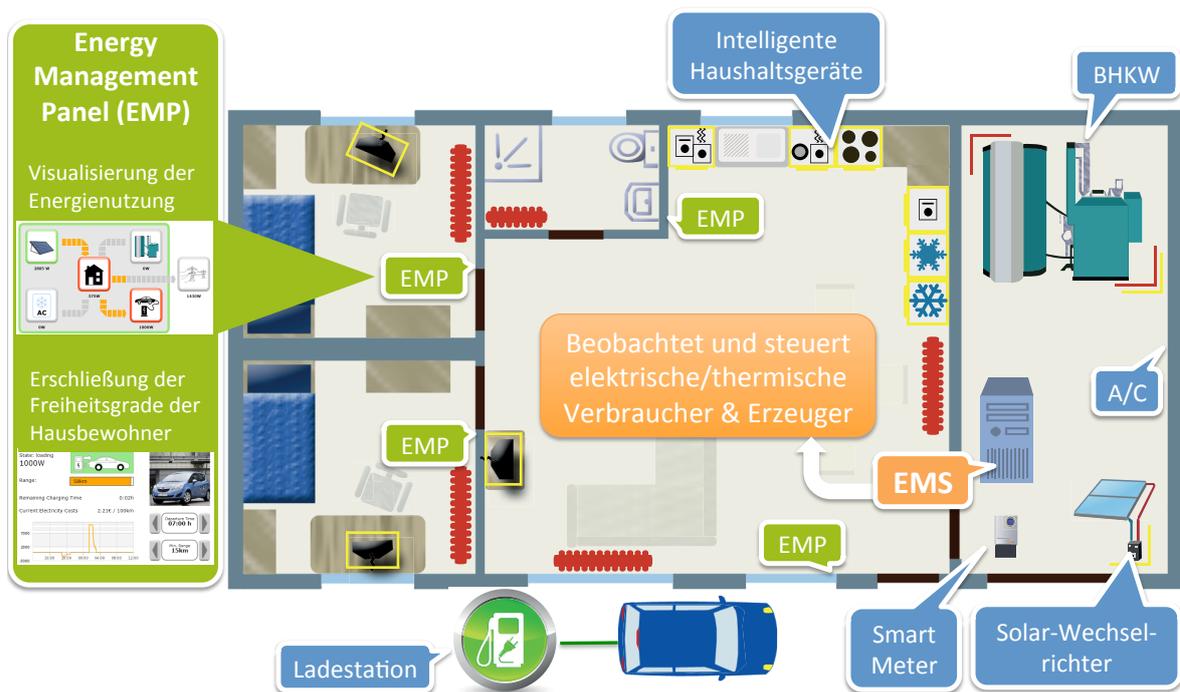


Abbildung 3.1: Grundriss des Energy Smart Home Lab

eine dynamische obere Grenze für die kumulierte Haushaltslast definiert und dessen Überschreitung zusätzliche Kosten verursacht. Da die monetären Vergütungen für eingespeisten Strom aus regenerativen Energiequellen über die letzten Jahre stetig gesunken sind und dieser Trend sich weiter fortsetzt, ist es für aktuell neu installierte PV-Anlagen per se lohnender, seinen produzierten Strom auch selbst zu verbrauchen [40], womit die Erfüllung der ersten Zielfunktion sicherlich die zweite Zielfunktion stark beeinflusst.

Die Architektur des EMS basiert auf den Prinzipien des Organic Computing [45], ein Forschungsbereich, welcher im Schwerpunktprogramm 1183 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) entstanden ist. Im Rahmen des Organic Computing wurde eine sogenannte generische Observer/Controller Architektur konzipiert, mit Hilfe derer ein komplexes System, welches nach gewissen Zielvorstellungen zu beeinflussen ist, um generische Instanzen erweitert wird. Diese sammeln und verarbeiten (Observer) einerseits Zustandsinformationen des zu beobachtenden Gesamtsystems<sup>5</sup> und wirken andererseits gemäß vorgegebener Richtlinien steuernd auf die Komponenten des Gesamtsystems ein (Controller). Insbesondere ist es erklärtes Ziel, dass sich die Systemkomponenten bis zu einem gewissen Grad selbstorganisiert verhalten, um somit auch die Komplexität eines sehr heterogenen Gesamtsystems, wie es beispielsweise das hier vorgestellte Smart Home aufweist, besser beherrschbar zu machen. Eine einzelne Komponente des Gesamtsystems Smart Home wäre beispielsweise das Elektroauto, ein intelligenter Verbraucher wie die Spül- oder Waschmaschine oder auch die Erzeuger PV-Anlage und  $\mu$ -BHKW. Jedem dieser einzelnen Verbraucher und Erzeuger wird eine sogenannte Observer-Controller-Einheit (kurz: O/C-Einheit) zugewiesen. Eine Übersicht über die O/C-Architektur, welche im Smart Home zum Einsatz kommt, ist Abbildung 3.2 zu entnehmen. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten dieser hierarchisch aufgebauten O/C-Architektur insofern

<sup>5</sup>In der Organic Computing Terminologie auch „System under observation and control“ genannt

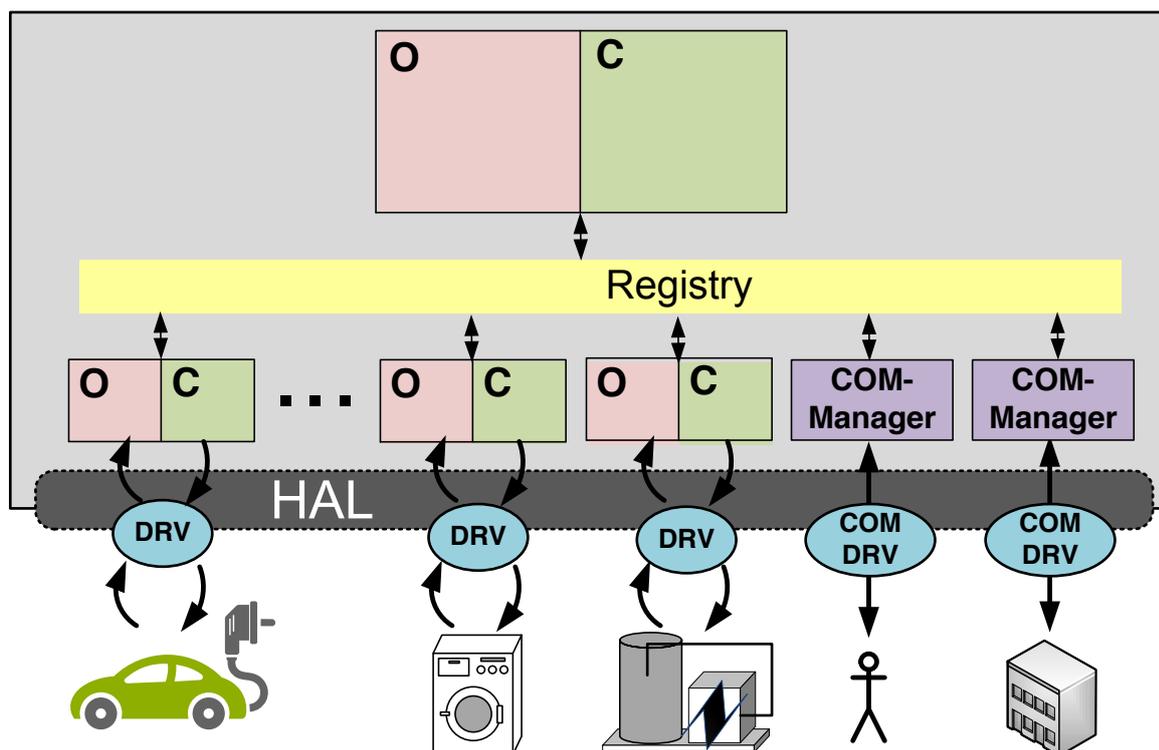


Abbildung 3.2: Überblick über die O/C-Architektur des Energiemanagement-Systems im Smart Home (angelehnt an [3])

näher beleuchtet, als dies für das weitere Verständnis der Integration des Elektroautos in das EMS hilfreich ist. Für eine tiefere und detailreichere Betrachtung der jeweiligen Bestandteile sei der interessierte Leser auf [3] verwiesen.

### Hardware-Abstraktions-Schicht und Treiber

Aus Abschnitt 3.1 geht bereits hervor, dass sehr unterschiedliche Komponenten zum Tragen kommen, die in das Energiemanagement integriert werden müssen. Um diese Heterogenität unter den Verbrauchern und Erzeugern beherrschen zu können, ist es sinnvoll, eine Abstraktionsschicht zwischen den O/C-Einheiten und der gerätespezifischen Kommunikation einzubinden. Diese Hardware-Abstraktions-Schicht (HAL) agiert als Schnittstelle zu den gerätespezifischen Treibern. Diese Treiber (in Abbildung 3.2 mit DRV bezeichnet) dienen wiederum dazu, die Information aus den generischen Datenobjekten, die jeweils einer Komponentenkategorie wie zum Beispiel der Klasse Waschmaschine,  $\mu$ -BHKW oder Elektroauto zugeordnet sind, in das jeweils gerätespezifische Kommunikationsprotokoll zu übersetzen und umgekehrt.

### Lokale O/C-Einheiten

Jeder einzelnen einzubindenden Komponente ist nicht nur ein eigener Treiber zugeordnet, sondern auch eine sogenannte lokale O/C-Einheit. Während einerseits den jeweiligen abstrakten Komponententypen wie bspw. Waschmaschine, BHKW und Elektroauto stets eine einzelne lokale O/C-Einheit zugeordnet ist, ist es andererseits möglich, dass unterschiedliche Treiber die gleiche lokale O/C-Einheit bedienen können. So wird den unterschiedlichen Kommunikationsprotokollen verschiedener Hersteller eines Gerätetyps Rechnung getragen. Eine

lokale O/C-Einheit verfügt somit über gerätespezifische und präzise Steuer- und Zustandsinformationen der entsprechenden Komponente. Die konkreten Zustandsinformationen des zu überwachenden physikalischen Geräts, die der Observer-Teil der O/C-Einheit sammelt, können im vorgestellten hierarchischen Ansatz somit abstrahiert an den globalen Observer weitergeleitet werden. Anweisungen, die über den globalen Controller an die entsprechenden lokalen O/C-Einheiten gesendet werden, können dann vom lokalen Controller über die HAL-Schicht und den passenden Treiber für das zu steuernde physikalische Gerät übersetzt werden.

#### **Registrar**

Das Registrar ermöglicht den Informationsaustausch zwischen den einzelnen O/C-Einheiten untereinander sowie zwischen der lokalen und der globalen O/C-Schicht und agiert somit als Middleware. Hierbei können sich die einzelnen Observer- und Controller-Einheiten beim Registrar für bestimmte Ereignisse anmelden, um Zustandsinformationen anderer Einheiten zu erhalten.

#### **Globale O/C-Einheit**

Während die lokalen Observer präzise und ausführliche Zustandsinformationen über die jeweils zugeordneten Haushaltskomponenten beziehungsweise das Elektrofahrzeug direkt über die HAL-Schicht sammeln und auswerten, vereint der globale Observer all diese Zustandsdaten in aggregierter Form und wertet diese aus, um sie anschließend dem globalen Optimierer, welcher sich in der Controller-Komponente befindet, zukommen zu lassen.

Die hinsichtlich einer zu erfüllenden Zielfunktion zentral bewertende Instanz des EMS wird durch den globalen Controller verkörpert. Sämtliche Zustandsinformationen über alle derzeit eingebundenen elektrischen und thermischen Verbraucher und Erzeuger, die von extern kommunizierten Strompreis- und Lastbegrenzungssignale sowie vom Benutzer über das EMP vorgegebenen Präferenzen laufen hier zusammen und fließen in den im Controller angesiedelten Optimierungsalgorithmus ein. Wie in [3] ausführlich erläutert, kommt hier ein evolutionärer Algorithmus aus der Klasse der metaheuristischen Verfahren zum Einsatz. Eine Metaheuristik bietet die Möglichkeit, innerhalb zeitlicher und rechenkapazitätsbedingter Restriktionen eine näherungsweise Lösung für ein Optimierungsproblem zu finden, welche nicht notwendigerweise das bestmögliche aber zumindest ein gutes Ergebnis darstellt. In [5] wurde bereits gezeigt, dass ein metaheuristisches Verfahren gerade auf einem kleinen stromsparenden System, wie es für gängige Haushalte Sinn machen würde, einem exakten Lösungsverfahren in der hier vorgestellten Komponentenumgebung vorzuziehen ist, wenn eine Lösung für das Optimierungsproblem in akzeptabler Rechenzeit gefunden werden soll. Die Funktionsweise des globalen Optimierers auf Basis eines EA ist in Abbildung 3.3 skizziert und wird im Folgenden kurz erläutert.

Die aus der Gruppe der naturinspirierten Verfahren stammenden evolutionären Algorithmen [74] versuchen, den biologischen Prozess der Evolution in gewisser Weise auf die Informatik zu übertragen und die entsprechenden Vorgänge abstrahiert abzubilden. Dementsprechend sind auch einige Termini dem biologischen Äquivalent entlehnt. So definiert ein EA einen Kreislauf, wie er auch in Abbildung 3.3 zu sehen ist. In diesem Kreislauf wird basierend auf einer aus mehreren sogenannten Individuen aufgebauten Population eine Teilmenge selektiert, auf welcher wiederum die genetischen Operatoren Rekombination und Mutation angewandt werden. Hiernach wird die neu entstandene Population aus veränderten Individuen evaluiert und hinsichtlich eines Abbruchkriteriums überprüft, ob ein erneuter Kreislauf – man spricht

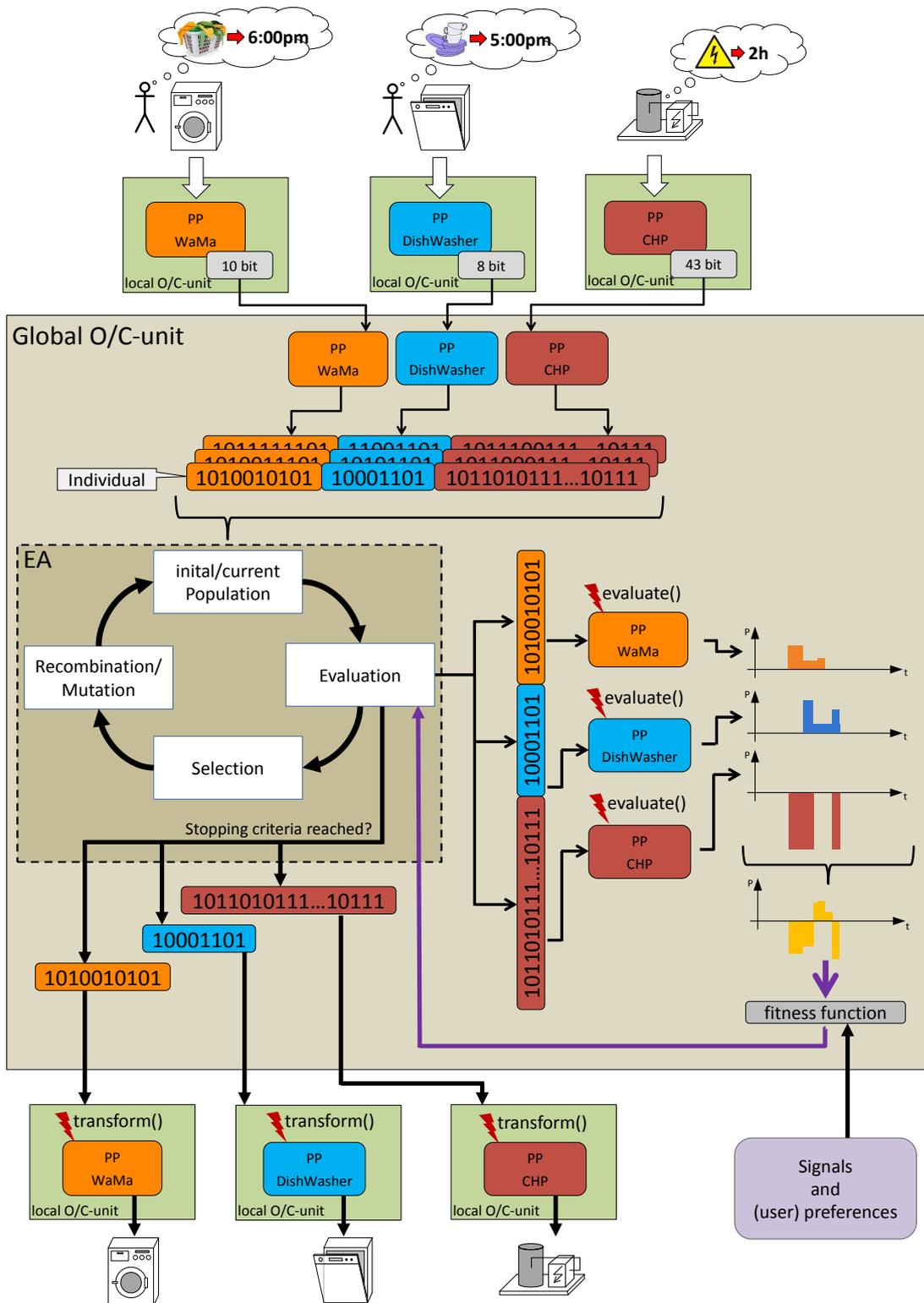


Abbildung 3.3: Globaler Optimierungsprozess im Organic Smart Home [4]

hier von einer Generation – durchgeführt werden soll. Ist die Abbruchbedingung erfüllt, so enthält die aktuelle Population den bis dahin besten Lösungskandidaten – das beste bisher berechnete Individuum. Für tiefergehende Erläuterungen zu evolutionären Algorithmen sei der Leser auf Weicker [74] verwiesen.

Eine Möglichkeit, ein Individuum einer Lösungspopulation zu kodieren, ist die binäre Kodierung, wie sie auch im Optimierer des Energiemanagements im ESHL implementiert und entsprechend in Abbildung 3.3 dargestellt ist. Wie klar zu erkennen ist, wird ein Individuum wiederum aus Teilindividuen zusammengebaut. Die Philosophie hinter dem im ESHL eingesetzten Optimierungsverfahren ist das Zusammenfügen einzelner flexibel kodierter und zu lösender Teilprobleme zu einem Gesamtenergiemanagementproblem.

Im hier vorgestellten Ansatz erzeugt jede Haushaltskomponente, welche am Energiemanagement teilnimmt, ein Teilproblem (in Abbildung 3.3 mit PP für ProblemPart bezeichnet). Dieses Teilproblem kapselt die Kodierung der relevanten Parameter, welche zur Einplanung der jeweiligen Haushaltskomponente im Rahmen des Gesamtenergiemanagements vonnöten sind. Hierbei werden die entsprechenden Parameter in ihre binäre Repräsentation übersetzt und ergeben einen der Haushaltskomponente (oder dem Elektrofahrzeug) zugeordneten Bitvektor individueller Länge. Sämtliche Bitvektoren aller zu steuernden Komponenten zusammengenommen ergeben dann ein Individuum. In der Terminologie der evolutionären Algorithmen entspricht ein solcher Bitvektor einem *Genotyp*, also einer möglichen Darstellung eines Lösungskandidaten für ein Optimierungsproblem. Die Kapselung jedes Teilproblems umfasst neben einem solchen Bitvektor ebenso eine Kodierungsvorschrift, die die binäre Kodierung der relevanten Parameter wieder auf ihre semantische Repräsentation, den sogenannten *Phänotyp*, abbildet. Man spricht hier auch von einer *Genotyp-Phänotyp-Abbildung*. Im Rahmen des hier vorgestellten Energiemanagementansatzes kann der Phänotyp unterschiedlicher Natur sein. Im Falle der Waschmaschine entspricht der Phänotyp bspw. dem Startzeitpunkt des eingestellten Waschprogramms, der Phänotyp des Elektrofahrzeugs hingegen entspricht einer Lastkurve, also einer Liste von chronologisch sortierten Tupeln mit Startzeitpunkten und Leistungswerten. Aufeinanderfolgende Startzeitpunkte definieren somit ein Intervall konstanter Leistung. Das letzte Tupel der Liste schließt einen Ladefahrplan mit dem Leistungswert 0 kW ab.

In Abbildung 3.3 wird beispielhaft anhand der drei verschiedenen Haushaltskomponenten Waschmaschine, Trockner und  $\mu$ -BHKW mit unterschiedlichen zeitlichen Restriktionen dargestellt, wie die Optimierung im *globalen* Controller abläuft. Sobald eine am Energiemanagement teilnehmende Komponente aufgrund einer Zustandsänderung – die Waschmaschine wurde programmiert und für spätestens 18 Uhr eingeplant, der Schichtspeicher des  $\mu$ -BHKW unterschreitet eine Mindesttemperatur, das Elektroauto wurde an die Ladestation angeschlossen – neu eingeplant werden muss, wird von der lokalen O/C-Einheit ein neues Teilproblem-Objekt erzeugt und an den globalen Observer gesendet, welcher das Wissen über die aktuell gültigen Teilprobleme aller lokalen O/C-Einheiten hält. Wie bereits erwähnt, werden hier alle Bitvektoren, die von den einzelnen Teilproblem-Objekten erzeugt wurden, zu einem Gesamtbitvektor, dem Individuum, zusammengefügt.

Im Laufe einer jeden Generation wird jedes Individuum hinsichtlich seiner Eignung für ein optimales Gesamtlastprofil untersucht. Hierbei wird aus jedem Teilproblem-Objekt eine Funktion aufgerufen, welcher das zum Teilproblem gehörige Bitvektor-Segment des Individuums übergeben wird, in Abbildung 3.3 mit `evaluate()` bezeichnet. Diese Funktion liefert eine Lastkurve der jeweiligen Komponente, im Schaubild durch die zweidimensionalen Leistung-pro-Zeit-Diagramme (P-t-diagramme) visualisiert, sowie einen zusätzlichen Bewertungsfaktor zurück.

Die jeweilige Lastkurve wird u. a. durch Anwendung einer Genotyp-Phänotyp-Abbildung erzeugt. Der Unterschied zwischen der `evaluate()` und der `transform()` Funktion wird z. B. anhand der Komponenten Waschmaschine und Elektrofahrzeug deutlich.

Der Genotyp, der dem Teilproblem Waschmaschine zugeordnet ist, wird im Zuge der Abbildung auf seinen Phänotyp zu einem Startzeitpunkt dekodiert. Zusammen mit dem hinterlegten programmspezifischen Lastprofil einer Waschmaschine kann hieraus das resultierende Lastprofil der Waschmaschine in einem gewissen Zeitraum, dem Optimierungshorizont, ermittelt werden. Der Optimierungshorizont entspricht einer Zeitspanne, die spezifisch und flexibel für jeden Verbraucher und Erzeuger, der in das EMS eingebunden wird, festgelegt wird und mehrere Stunden umfassen kann. Hierbei kann dieser bspw. beim E-Fahrzeug die Zeitspanne von der Eingabe des Abfahrtszeitpunkts (bspw. über das EMP) bis zum tatsächlichen Abfahrtszeitpunkt umfassen, oder aus kodierungstechnischen und lastspezifischen Gründen auch eine geringere Zeitdauer gewählt werden, wie in Abschnitt 4.3.1 noch erläutert werden wird. Der Genotyp des Teilproblems Elektrofahrzeug entspricht bereits einem Lastprofil, welches über die Zeitspanne des Optimierungshorizonts definiert ist. Unabhängig von der konkreten Ausprägung des Phänotyps einer Komponente liefert die Funktion `evaluate()` stets ein zum Teilproblem gehöriges Lastprofil für die Dauer des Optimierungshorizonts. Sämtliche Lastprofile aller Komponenten werden dann zu einem Gesamtlastprofil zusammengefügt und einer Bewertung unterzogen, im Schaubild mit `fitness function` gekennzeichnet. Diese Fitnessfunktion entspricht der bereits in Abschnitt 3.2 angesprochenen Zielfunktion und bewertet bspw. die Kosten dieses Gesamtlastprofils durch Verrechnung des Stromtarifs und einer optionalen Lastgrenze, deren Überschreitung zusätzliche Kosten verursacht. Der bereits angesprochene Bewertungsfaktor, welcher durch jedes Teilproblem im Rahmen der `evaluate()`-Funktion zurückgeliefert wird, beeinflusst darüber hinaus die Kosten.

Sobald ein vorher festgelegtes Abbruchkriterium für den EA erreicht ist, wird das resultierende beste Individuum ausgewählt und der jeweiligen Controller-Komponente einer jeden lokalen O/C-Einheit die entsprechende Steuerinformation für das assoziierte Gerät übermittelt. Hierbei wird also dem lokalen Controller nach Aufruf der Teilproblem-eigenen Methode `transform()` der gerätespezifische Phänotyp kommuniziert. Diese Steuerinformation leitet bspw. die Waschmaschine oder den Trockner dazu an, zum errechneten Startzeitpunkt das immer gleiche (oder programmspezifische) Lastprofil abzuarbeiten. Dem Elektrofahrzeug wird hingegen das flexible Lastprofil an sich kommuniziert, welchem es zu folgen hat.

Da beispielsweise die Waschmaschine eine je nach eingestelltem Waschprogramm fix vorher-sagbare Lastkurve erzeugen wird und nicht unterbrechbar ist, das Elektroauto jedoch sehr flexibel Energie laden wie auch rückspeisen kann, stellt eine geeignete effiziente Kodierung für die Einplanung des Fahrzeugs eine größere Herausforderung dar. Diese Kodierungsansätze werden in Kapitel 4 näher erläutert.

Nachdem nun die zentralen Komponenten des EMS grundlegend eingeführt wurden, muss nun noch der Blick auf die Benutzungsschnittstelle gerichtet werden, welche es dem Bewohner des Smart Home und gleichzeitig Fahrer des Elektrofahrzeugs ermöglicht, seine Zielvorgaben dem EMS mitzuteilen. Hinsichtlich des Elektrofahrzeugs gibt es zwei essentielle Größen, die der Benutzer vorgibt: die geplante *Abfahrtszeit* sowie die gewünschte *Mindestreichweite*, die das E-Fahrzeug so schnell wie möglich geladen haben sollte. Da mit der Benutzungsschnittstelle im Fahrzeug und dem EMP nun zwei Eingabequellen existieren, entsteht hier ein Konflikt bezüglich der Deutungshoheit der Informationen, je nachdem aus welcher Richtung diese kommen. Mit der genaueren Betrachtung und Auflösung dieses Konflikts beschäftigt sich der folgende Abschnitt.

### 3.3 Der Konflikt zweier Eingabequellen – E-Fahrzeug und EMP

Der Observer einer lokalen O/C-Einheit hat die Möglichkeit, sich über neue Ereignisse, die mittels des Registrars kommuniziert werden, informieren zu lassen. Im Falle des Elektrofahrzeugs interessiert sich der ihm zugeordnete lokale Observer speziell für manuelle Eingaben, die vom Benutzer über das EMP erfolgt sind, da hierüber der gewünschte Abfahrtszeitpunkt sowie die gewünschte Mindestreichweite des E-Fahrzeugs angegeben werden können, wie in Abbildung 3.4 dargestellt. Diese Informationen können auch über den dem E-Fahrzeug

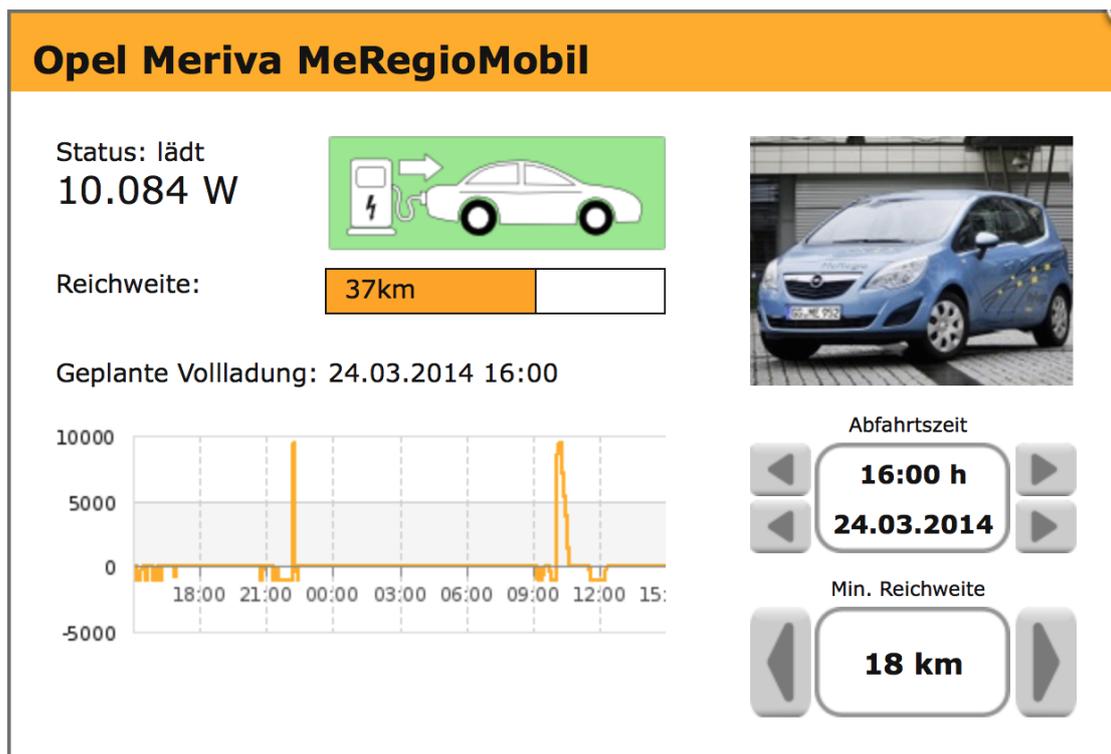


Abbildung 3.4: EMP-Benutzungsschnittstelle zur Eingabe des gewünschten Abfahrtszeitpunkts und der Mindestreichweite

zugeordneten Treiber an den Observer gelangen, falls der Nutzer diese Informationen bereits direkt über die Benutzungsschnittstelle im Fahrzeug vor Ladebeginn hinterlegt hat. Hierbei können Inkonsistenzen entstehen, die es zu lösen gilt. Folgender Ablauf verdeutlicht einen potentiellen Konflikt zwischen diesen beiden Eingabequellen:

1. Der Bewohner kehrt abends um 18 Uhr von der Arbeit zurück und verbindet das Elektroauto mit der Ladestation. Das EMP hat als Abfahrtszeitpunkt noch 8 Uhr morgens desselben Tages gespeichert, ein Wert, welcher am vorigen Abend vom Bewohner über das Touch-Display eingegeben wurde.
2. Der Treiber kommuniziert an den lokalen Observer den Abfahrtszeitpunkt, welcher vom Elektroauto bei Initialisierung des Ladevorgangs übermittelt wurde. Dies kann ein Zeitpunkt in der Zukunft oder der aktuelle Zeitpunkt sein, falls der Nutzer keinen expliziten Abfahrtszeitpunkt über die Benutzungsschnittstelle im Auto angegeben hat, was ein sofortiges Laden nach sich ziehen würde.

Da der im EMP gespeicherte Abfahrtszeitpunkt älter als der vom Fahrzeug (und somit Treiber) übermittelte ist, hat Letzterer eine höhere Priorität. Dies führt dazu, dass das EMP dazu veranlasst wird, sowohl Abfahrtszeitpunkt als auch minimale Reichweite durch die vom Treiber übermittelten Werte zu ersetzen, was ein visuelles Update auf den Touch-Displays zur Folge hat.

3. Ändert der Hausbewohner nun über das EMP den Abfahrtszeitpunkt oder die minimale Reichweite, so werden beide Werte als Aktualisierung an den lokalen Observer gesendet und von diesem als neue Richtlinie übernommen. Hierbei kann der Abfahrtszeitpunkt auch zeitlich vor der vom Treiber kommunizierten Abfahrtszeit liegen, wichtig ist in diesem Fall nur der Zeitpunkt einer *Aktualisierung* der relevanten beiden Parameter.
4. Ist laut des vom EMS an das E-Fahrzeug kommunizierten Lastprofils irgendwann eine Ladepause einzulegen, so wird sich das Ladesteuergerät im Elektrofahrzeug selbst abschalten, um die 12 V Batterie des Autos, welche als Stromquelle für das Steuergerät fungiert, nicht zu entladen.
5. Wacht das E-Fahrzeug wieder selbständig auf, da die anvisierte Ladepause beendet ist, wird es erneut seine initialen Ladeparameter samt Abfahrtszeitpunkt und minimale Reichweite übermitteln.

Schritt fünf führt nun zu einer Situation, in der entschieden werden muss, ob die vom Fahrzeug erneut aktualisierten Parameter die über das EMP gelieferten Werte überschreiben sollen, oder nicht. Eigentlich würde der Bewohner annehmen, dass die zuletzt manuell über das EMP eingegebenen Werte maßgeblich sind (sofern der angegebene Abfahrtszeitpunkt nicht in der Vergangenheit liegt), allerdings unterscheidet sich auf den ersten Blick ein Erwachen aus einer Ladepause nicht von einem erneuten Verbinden des Fahrzeugs mit der Ladestation nach einer zwischenzeitlichen Fahrt, da die komplette IP-basierte Kommunikation in beiden Fällen terminiert wird.

Des Weiteren muss der Fall berücksichtigt werden, dass der Bewohner rein theoretisch schon morgens vor der Abfahrt den nächsten Abfahrtszeitpunkt des darauf folgenden Morgens angibt. Nun gilt es abzuwägen, ob der Abfahrtszeitpunkt, welcher bei dem am Abend erfolgenden Ladevorgang vom E-Fahrzeug kommuniziert wird, höher prior zu bewerten ist, weil diese Daten später aktualisiert wurden, oder der ebenfalls in der Zukunft liegende Abfahrtszeitpunkt, welcher im EMP noch gespeichert ist, den maßgeblichen Wert darstellt.

Es gibt zwei Lösungsmöglichkeiten für das Problem der Deutungslosigkeit aktueller Werte:

1. Man ergänzt die Benutzungsschnittstelle im EMS um eine Option, die festlegt, welche Eingabequelle stets zu bevorzugen ist.
2. Es wird stets die aktuellste im lokalen Observer eintreffende Nachricht über die Aktualisierung des Abfahrtszeitpunkts für die Ladesteuerung herangezogen.

Gegen Option eins spricht, dass der Nutzer möglicherweise stets die Möglichkeit haben möchte, über beide Benutzungsschnittstellen den Abfahrtszeitpunkt einzugeben, ohne jeweils vorher die Option im EMS umstellen zu müssen. Diese Flexibilität hat zudem auch den Vorteil, dass die Benutzungsschnittstelle im EMP nicht unnötig mit Optionen überfrachtet, sondern möglichst einfach gehalten wird.

Im vorliegenden Fall wurde daher Variante zwei gewählt. Nun gilt es noch dem Problem der Unterscheidung zwischen Ladepause und völlig neuem Ladeprozess zu begegnen. Die

ISO/IEC 15118-2 Spezifikation bietet die Möglichkeit, zwischen einer Ladepause und einem gewollten Ende einer Ladesession zu unterscheiden, um der Ladestation die Haltung gewisser Zustandsinformationen zu ermöglichen. Wie in Abschnitt 2.2.1, Seite 38, bereits erwähnt, liefert die Nachricht `SessionStopReq` den Parameter `ChargingSession`, welcher darüber aufklärt, ob die Ladesession nur pausiert (**Pause**) oder gänzlich beendet (**Terminate**) werden soll. Diese Zustandsinformation müsste daher vom Treiber stets an den lokalen Observer kommuniziert werden, damit dieser die korrekte Entscheidung darüber treffen kann, welcher Zeitstempel nun für die Ladesteuerung ausschlaggebend ist. Das E-Fahrzeug würde eine Terminierung der Ladesession nur dann anstoßen, wenn die Batterie ihren maximalen Ladezustand erreicht hat oder der Nutzer den Ladevorgang manuell abgebrochen hat.

Hat das Elektrofahrzeug nun eine Ladesession ordnungsgemäß beendet, so sind dennoch zwei weitere Situationen denkbar, in denen das Fahrzeug eine neue Ladesession starten würde, obwohl es immer noch mit der Ladestation verbunden ist.

1. Das Elektrofahrzeug wurde bereits vor dem Abfahrtszeitpunkt vollgeladen und aus Energiemanagement-Sicht erscheint es sinnvoll, einen Teil der gespeicherten Energie aus dem Auto zu verwenden und zu einem späteren Zeitpunkt noch vor der Abfahrt dieselbe Energiemenge wieder zu laden. In diesem Fall wird der Treiber das E-Fahrzeug dazu veranlassen, den Ladevorgang erneut zu initialisieren.
2. Es tritt ein Fehler in der Kommunikation zwischen E-Fahrzeug und Ladestation und somit ein Timeout auf, welcher die Reinitialisierung einer Ladesession zur Folge hätte.

In beiden Fällen würde der Nutzer davon ausgehen, dass die Einstellungen, die manuell am EMP vorgenommen wurden, immer noch gültig sind. Es muss daher vermieden werden, dass der Nutzer verwirrt wird, weil aus einem ihm unersichtlichen Grund die Abfahrtszeit (und evtl. die Mindestreichweite) ohne sein Zutun verändert wurden und das Fahrzeug gegebenenfalls entgegen seiner Intention als Verbraucher neu eingeplant wird.

Im ersten Fall hat der lokale Observer das Wissen darüber, dass das Elektrofahrzeug neu eingeplant werden muss und kann somit die Information abspeichern, dass die Vorgabe aus dem EMP der neuen Information aus dem Fahrzeug vorzuziehen ist. Im zweiten Fall müsste der fehlerbehaftete Verbindungsabbruch vom Treiber an den lokalen Observer kommuniziert werden.

Aus den obigen Überlegungen heraus scheint der am einfachsten gangbare und robusteste Weg der zu sein, die physikalische Konnektivität des Autos mit der Ladestation zu überprüfen<sup>6</sup> und nur bei einer physikalischen Trennung des Autos von der Ladestation davon auszugehen, dass der nächste vom Auto kommunizierte Abfahrtszeitpunkt für die Einplanung zu verwenden ist.

Im letzten Abschnitt 3.4 dieses Kapitels wird nun auf architekturbedingte Einschränkungen bei der Kodierung des Teilproblems Elektrofahrzeug eingegangen.

---

<sup>6</sup>Dies kann über die Messung der Spannung erfolgen, wobei eine an der Steckdose der Ladestation (Socket) anliegende Spannung von 12 V bedeutet, dass kein Elektroauto mit der Ladestation verbunden ist, eine Spannung von 9 V die Verbindung über das Ladekabel und 6 V die Ladebereitschaft des E-Fahrzeugs signalisiert (vgl. Zustand A, B und C in Abbildung 2.10).

### 3.4 Architekturbedingte Kodierungs-Einschränkungen

Erklärtes Ziel dieser Arbeit ist es, ein rückspeisefähiges Elektrofahrzeug in das bereits bestehende Energiemanagement-Framework des Smart Home einzubinden, sodass die im Fahrzeug verbaute Batterie als flexibler Verbraucher und Energiespeicher eingeplant werden kann. Hierbei wird zur Optimierung des Ladefahrplans ein *Evolutionärer Algorithmus (EA)* eingesetzt, welcher in Abschnitt 3.2 bereits beschrieben wurde.

Es ist hingegen nicht Ziel dieser Arbeit, den bisherigen Optimierungsalgorithmus auf Basis eines EA sowie seine Umsetzung im globalen Optimierer zu verändern. Vor diesem Hintergrund ist die Art der Kodierung, welche eine geeignete Einplanung des E-Fahrzeugs ermöglicht, an die Struktur eines obig beschriebenen Teilproblems gebunden und stellt somit die Basis für die Möglichkeiten der Optimierung dar. Konkret bedeutet dies, dass der Genotyp stets in Form eines *Bitvektors* und bspw. nicht in der Form eines gemischt ganzzahligen Individuums vorliegen muss. Auch ist die Länge eines Bitvektors zwar generell variabel, jedoch muss zum Zeitpunkt der Instanziierung eines Teilproblem-Objekts für das Elektrofahrzeug die *Länge dieses Bitvektors bekannt* gegeben werden.

Die Art der Abbildung des Elektrofahrzeug-Genotyps auf dessen Phänotyp sowie die Betrachtung diverser noch einzuführender Restriktionen stellt in dieser Arbeit die wesentliche Stellschraube bei der Optimierung dar. Die Anzahl der Generationen, die Populationsgröße, die Mutationsrate sowie die Entscheidungsgrundlage, auf Basis derer ein Individuum selektiert wird, haben ebenfalls einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Optimierungsergebnis und werden in Abschnitt 6.2.2 präsentiert.

## KAPITEL 4

# INTEGRATION DES E-FAHRZEUGS IN DAS ENERGIEMANAGEMENT

Während im vorigen Abschnitt 3.2 die lokale O/C-Einheit als solche eher aus einem generischen Blickwinkel betrachtet wurde, dient dieses Kapitel dazu, sich die konkreten Eigenheiten einer lokalen O/C-Einheit, welche speziell für die Integration des Elektrofahrzeugs in das EMS konzipiert wurde, näher anzuschauen. Hierbei gilt es, die Komponenten lokaler Observer, lokaler Controller, das spezifische Teilproblem sowie die Austauschobjekte zwischen Treiber und der Observer- bzw. Controller-Einheit detailliert zu beschreiben.

Zuvor wird jedoch in Abschnitt 4.1 ein zusammenfassender Überblick über die kommunikationstechnische Einbindung des Elektrofahrzeugs in das EMS des Smart Home gegeben. Hiermit wird das Gesamtszenario „Einbindung eines Elektrofahrzeugs in das Energiemanagement eines Smart Home“ aus einer größeren Perspektive heraus anschaulich präsentiert.

### 4.1 Makroskopische Perspektive auf das Smart Home Szenario

In Abschnitt 2.2.1 wurde bereits erläutert, dass das Kommunikationsprotokoll ISO/IEC 15118 nach einem Client-Server-Schema konzipiert ist, in welchem das Elektroauto bzw. der EVCC als Client stets Anfragen an den SECC der Ladestation (Server) stellt, auf welche dieser innerhalb gewisser Timeout-Fristen antworten muss. In dem dieser Arbeit zugrunde liegenden Versuchsaufbau befindet sich der ISO/IEC 15118 Server nicht in der Ladestation, sondern auf dem Steuerrechner im Smart Home (ESHL), welcher das EMS beherbergt. Daher agiert die Ladestation lediglich als durchleitende Einheit für die relevanten Ladesteuerungsinformationen.

Abbildung 4.1 gibt einen Überblick über das Konzept der Einbindung des E-Fahrzeugs in das EMS des Smart Home und ist im Wesentlichen in drei Bereiche eingeteilt: das Elektrofahrzeug, das Ladeequipment (Ladekabel und Ladestation) sowie das Smart Home.

#### Das Elektrofahrzeug

Im Elektrofahrzeug sind diverse Komponenten verbaut, die im Rahmen der Ladesteuerung relevant werden und sich somit auch in Abbildung 4.1 wiederfinden:

- **PLA:** Der Powerline-Adapter dient dazu, die Datensignale, welche über den Control Pilot (CP) Pin (siehe Abschnitt 2.1.1 und 2.1.2) auf die Ladeleitung aufmoduliert werden,

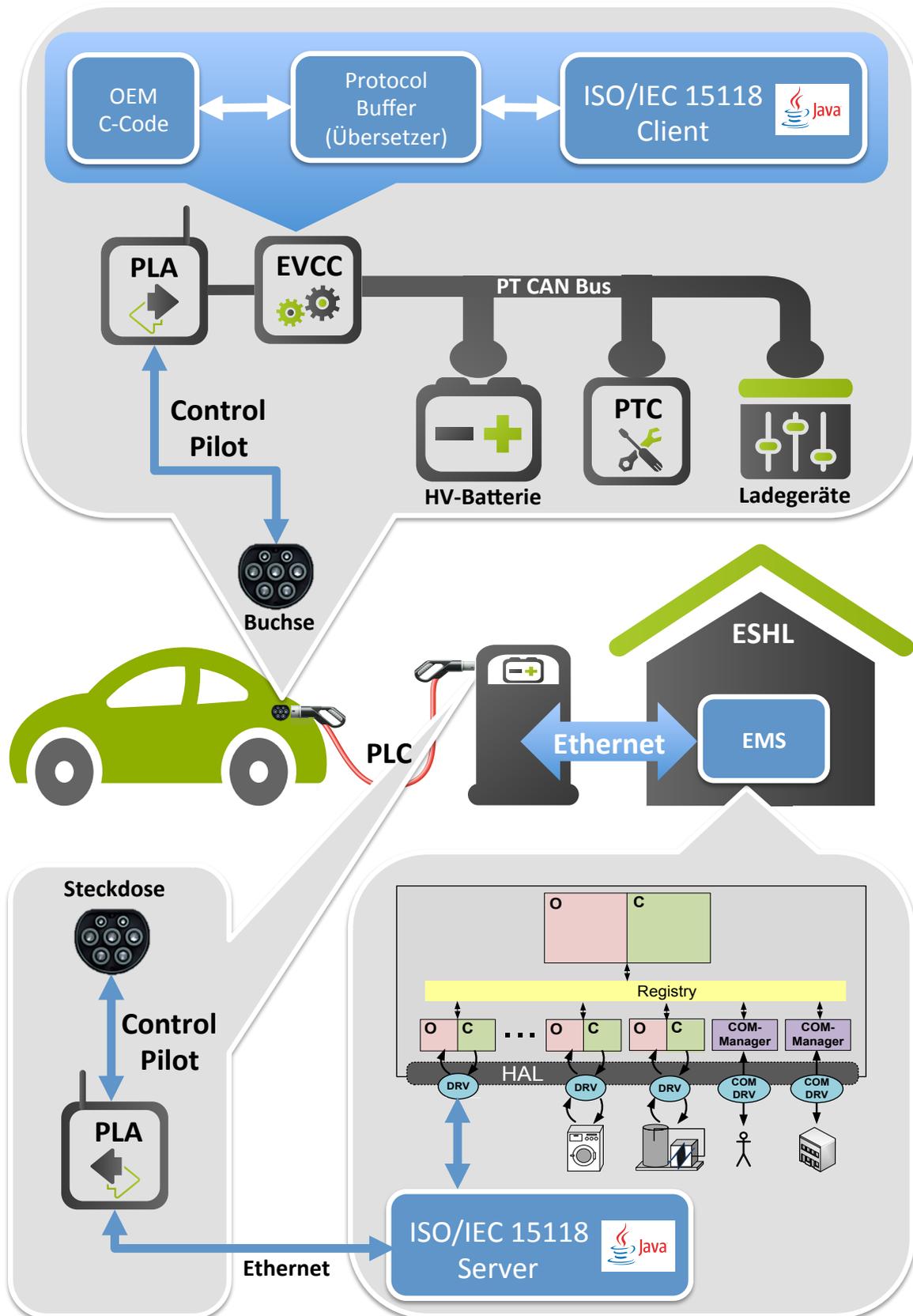


Abbildung 4.1: Übersicht zur Integration des Elektrofahrzeugs in das Smart Home Energiemanagement (das Ladekabel ist Abbildung 2.1 entlehnt)

zu demodulieren und die somit wiedergewonnenen Ladesteuerungsinformationen dem EVCC zukommen zu lassen.

- **EVCC:** Der Electric Vehicle Communication Controller repräsentiert den Steuerrechner im Elektrofahrzeug. Auf diesem Gerät befindet sich u. a. ein vom OEM stammendes Programm, geschrieben in der hardwarenahen Programmiersprache C, welches steuernde Signale auf den CAN-Bus<sup>1</sup> setzen und wiederum Informationen vom CAN-Bus (bspw. Statusinformationen des PTC) lesen kann.
- **PTC:** Der Powertrain-Controller ist ein Steuergerät für den Antriebsstrang im Elektrofahrzeug. Er empfängt über den PT CAN-Bus Statusinformationen von der Hochvolt (HV)-Batterie und von den Ladegeräten. Basierend auf Steuerinformationen, die der PTC vom EVCC erhält, weist er die Ladegeräte und den Wechselrichter an, mit entsprechender Leistung zu laden oder rückzuspeisen.

Der ISO/IEC 15118 Client, welcher im EVCC angesiedelt ist, muss in der Lage sein, zu Beginn einer Ladesession die fahrzeuginternen Schütze zu schließen, damit der Strom fließen kann, und diese auch wieder zu öffnen, sobald die Ladung beendet werden soll. Darüber hinaus muss das Ladeprofil über den CAN-Bus dem PTC übermittelt werden. Da jedoch nur der OEM-spezifische C-Code auf den CAN-Bus schreiben und von dort Informationen lesen kann, benötigt man eine Übersetzungseinheit, welche die Informationen zwischen C-Code und Java-Code transportiert. Hierfür eignet sich Googles ProtocolBuffer<sup>2</sup>, welcher als generische Schnittstellen-Beschreibungs-Sprache für die Definition auszutauschender Nachrichten zu verstehen ist. Mit dieser Schnittstelle lassen sich Datenstrukturen in .proto-Dateien textuell beschreiben und mittels eines mitgelieferten Compilers auf effiziente Weise in eine Repräsentation der entsprechenden Programmiersprache (C, C++, Python oder Java) übersetzen. Komplexe Datentypen lassen sich wiederum verschachtelt definieren und über externe .proto-Dateien importieren. Listing 4.1 veranschaulicht die Datenstruktur, welche zwischen C-Code und Java-Client ausgetauscht wird. Die Spezifikation von Googles ProtocolBuffer legt fest, dass die Parameter jeder auszutauschenden Nachricht entweder als **optional** oder **mandatory** gekennzeichnet und mit aufsteigenden IDs versehen werden müssen.

Listing 4.1: ProtoBufferExchangeProto.proto

```
import "AC_EVChargeParameterProto.proto";
import "ChargingStatusReqProto.proto";

message ProtocolBufferExchange {
    optional AC_EVChargeParameter ac_ev_charge_parameter = 1;
    optional bool close_contactor = 2;
    optional int32 current_p_max = 3;
    optional ChargingStatusReq charging_status_req = 4;
    optional StopChargingReason stop_charging = 5;
    optional int32 wakeup_in_seconds = 6;
    optional string error_message = 7;
    optional MessageType expected_response = 8;
```

<sup>1</sup> Der CAN-Bus (Controller Area Network) ist ein serielles Feldbussystem, welches in allen gängigen Fahrzeugen zur Informationsübertragung zwischen einzelnen internen Steuergeräten eingesetzt wird.

<sup>2</sup><https://code.google.com/p/protobuf/>

```

enum MessageType {
    NO_MESSAGE_TYPE_SET = 0;
    AC_EV_CHARGE_PARAMETER = 1;
    CLOSE_CONTACTOR = 2;
    CURRENT_P_MAX = 3;
    CHARGING_STATUS_REQUEST = 4;
    STOP_CHARGING_REASON = 5;
    WAKEUP_IN_SECONDS = 6;
}

enum StopChargingReason {
    NO_REASON = 0;
    BATTERY_IS_FULL = 1;
    USER_INTERRUPTED = 2;
    SESSION_TERMINATED_SUCCESSFULLY = 3;
    SESSION_TERMINATED_WITHOUT_SUCCESS = 4;
}
}

```

Wie dem Listing zu entnehmen ist, werden hierbei Informationen bzgl. der initialen Ladeparameter `AC_EVChargeParameter` (siehe Listing 4.2), des Zustands des Ladeschützes (offen oder geschlossen), der aktuell bezogenen Ladeleistung bzw. gelieferten Rückspeiseleistung und der Parameter einer aktiven Ladesession `ChargingStatusReq` (siehe Listing 4.3) ausgetauscht. Zusätzlich kann der EVCC mit `wakeup_in_seconds` angewiesen werden, sich schlafen zu legen, sollte aufgrund des Ladeprofiles eine längere Ladepause eingelegt werden, und zum vorgegebenen Zeitpunkt wieder aufzuwachen, um die Ladesession fortzusetzen. Weiterhin können Zustandsinformationen ausgetauscht werden, welche bspw. einen Grund für die Beendigung einer Ladesession oder eine Fehlermeldung angeben. Der Java-Client stellt stets eine Anfrage an den C-Code, welcher anhand des gesetzten Feldes `expected_response` weiß, welche Informationen die Antwort enthalten muss. Zwischen C-Code und Java-Client besteht eine TCP-Verbindung zum Zwecke einer zuverlässigen Kommunikation.

Listing 4.2: `AC_EVChargeParameterProto.proto`

```

message AC_EVChargeParameter {
    optional int32 departure_time = 1 [default = 0];
    required int32 e_amount = 2;
    required int32 e_amount_discharge = 3;
    required int32 ev_max_voltage = 4;
    required int32 ev_max_current = 5;
    required int32 ev_min_current = 6;
    required int32 ev_max_current_discharge = 7;
    required int32 ev_min_current_discharge = 8;
    required int32 soc = 9; // unit: percentage
    optional int32 min_soc = 10 [default = 30];
}

```

Listing 4.3: ChargingStatusReqProto.proto

```

message ChargingStatusReq {
    required int32 soc = 1;
    required int32 e_amount = 2;
    required int32 e_amount_discharge = 3;
}

```

### Das Ladekabel und die Ladestation

Das Typ-2 Ladekabel nach IEC 62196 transportiert die Informationen über den integrierten Control Pilot Pin via Powerline Kommunikation (PLC) zwischen EVCC und der Ladestation. Der in der Ladestation integrierte Powerline Adapter sorgt – wie bereits im E-Fahrzeug – für die (De-)Modulation der Datensignale und leitet diese über eine Ethernet-Schnittstelle an den Steuerrechner im Smart Home weiter, auf welchem das EMS ausgeführt wird.

### Das Smart Home

Das in der ISO/IEC 15118 Spezifikation definierte Ladesteuergerät auf Ladestationsseite (der SECC) kommt genau genommen nicht als solches zum Einsatz. Stattdessen ist der ISO/IEC 15118 Server auf dem Steuerrechner im Smart Home angesiedelt. Der eigens für das Elektrofahrzeug entwickelte Treiber steht in direkter Kommunikation zum ISO/IEC 15118 Server. Dieser Treiber hat nicht nur die Funktion, die Kommunikation mit dem E-Fahrzeug auf Basis des ISO/IEC-Standards zu ermöglichen, sondern steuert ebenfalls den Ladeschutz der Ladestation sowie das Powerline-Modul.

Der ISO/IEC 15118-Client wie auch -Server kommunizieren über eine TCP-Verbindung, um auch hier eine zustandsbehaftete und zuverlässige Kommunikation zu ermöglichen.

Nachdem hiermit ein Überblick geschaffen worden ist, kann der Blick nun auf die Details der lokalen O/C-Komponente und des Treibers für das E-Fahrzeug gerichtet werden.

## 4.2 Der lokale Observer

Der lokale Observer hat die Aufgabe, neue Informationen, welche das Elektroauto über den Treiber oder das EMP über das Registrar übermittelt, zu verarbeiten und entsprechend mit einer Meldung an die globale O/C-Einheit (wie in Abschnitt 3.2 bereits beschrieben) darauf zu reagieren. Die Softwarearchitektur des Energiemanagements im Smart Home bietet für einen `LocalObserver` zwei vererbte Methoden an, über die auf Ereignisse, die die Einplanung des Ladevorgangs beeinflussen, reagiert werden kann: `onDeviceStateUpdate` und `onQueueEventReceived(EventExchange event)`.

### Informationen aus Richtung des E-Fahrzeugs

Mittels der `onDeviceStateUpdate`-Methode werden neue Informationen vom Treiber, welcher dem E-Fahrzeug zugeordnet ist und u. a. als Übersetzungseinheit für das ISO/IEC 15118-Protokoll fungiert, an den lokalen Observer gesendet. Es gibt drei Zustände, aus denen heraus das E-Fahrzeug neue Informationen über den Treiber an das Energiemanagement übermittelt:

1. Bei der initialen Übermittlung der fahrzeugseitigen Ladeparameter
2. Bei der zyklischen Aktualisierung der Ladeparameter während eines Ladevorgangs
3. Bei der (unvorhergesehenen) Beendigung eines Ladevorgangs

Ersteres wird über die Nachricht `ChargeParameterDiscoveryReq` (vgl. Abbildung 2.10) ausgelöst, welche folgende Parameter übermittelt, die über den Treiber im Objekt `CarDetails` gekapselt werden:

- Abfahrtszeitpunkt (`departureTime`)
- Benötigte Energiemenge (`eAmount`)
- Zur Rückspeisung verfügbare Energiemenge (`eAmountDischarge`)
- Maximale Ladeleistung (`pMax`)
- Minimale Ladeleistung (`pMin`)
- Maximale Rückspeiseleistung (`pMaxDischarge`)
- Minimale Rückspeiseleistung (`pMinDischarge`)
- Aktueller Ladezustand (`soc`)
- Minimaler Ladezustand (`minSOC`)

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde in das Standardisierungsgremium aktiv ein Vorschlag bzgl. der ISO/IEC 15118-2 Spezifikation eingereicht, welcher u. a. den Austausch von Parametern vorsieht, die die Rückspeisung von gespeicherter Energie in das Energienetz betreffen. Dieser Vorschlag fand jedoch nicht Einzug in die finale Version der aktuellen Spezifikation [39], daher wurde die `ChargeParameterDiscoveryReq` Nachricht um jene Parameter ergänzt. Abschnitt 6.1.2 gibt Aufschluss darüber, wie eine standardkonforme Implementierung gewährleistet werden kann, die die hier vorgestellten Erweiterungen dennoch ermöglicht.

Die Statusinformationen während eines aktiven Ladevorgangs werden mittels der Nachricht `ChargingStatusReq` (vgl. Abbildung 2.10) in zyklischen Abständen über den Treiber weiter an den lokalen Observer gesendet und ebenfalls im Objekt `CarDetails` gekapselt. Diese aktualisierten dynamischen Daten umfassen die Parameter

- benötigte Energiemenge (`eAmount`),
- zur Rückspeisung verfügbare Energiemenge (`eAmountDischarge`) und
- aktueller Ladezustand (`soc`).

Hierbei ist anzumerken, dass diese Nachricht laut der ISO/IEC 15118-2 Spezifikation keine Parameter enthält und im Prinzip eher als eine Art keep-alive-Nachricht Verwendung findet. Durch die Nachrichten, welche im Falle des Gleichstrom-Ladens (DC) – ein Anwendungsfall, welcher im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet wird – während eines Ladevorgangs zwischen Elektroauto und Ladestation zwecks Ladestromjustierung zyklisch ausgetauscht werden, findet ein stetes Statusupdate zwischen den beiden Instanzen statt. Da diese Parameter beim Wechselstrom-Laden (AC) nicht benötigt werden, wäre die Überprüfung einer intakten Kommunikation zwischen Ladestation und Elektroauto sowie eine Rückmeldung der Ladestation bezüglich unvorhergesehener Netzengpässe während eines Ladevorgangs somit nicht mehr möglich. Aus diesem Grund wurde für den AC-Ladefall die parameterlose Nachricht `ChargingStatusReq` eingeführt, über deren Pendant `ChargingStatusRes` die Ladestation stets eine Neuverhandlung des Lastprofils anstoßen kann (siehe Abschnitt 2.2.1, Seite 38).

Diese Request-Nachricht wurde im Rahmen der Integration des Elektrofahrzeugs in das Energiemanagement um die oben genannten drei Parameter erweitert, sodass über das EMP stets aktuelle Informationen hinsichtlich des Ladestatus' des Fahrzeugs auf den Touch-Displays des Smart Home visualisiert werden können. Die Daten aus dem E-Fahrzeug sind genauer als das ladestationsseitig gemessene Integral über die geflossene Energiemenge, da Wirkungsgradverluste aufgrund von Nebenverbrauchern im Fahrzeug somit besser berücksichtigt werden.

### Informationen aus Richtung des EMP

Die Methode `onQueueEventReceived(EventExchange event)` bietet dem lokalen Observer die Möglichkeit, sich über neue Ereignisse, die mittels des Registrars (vgl. Abschnitt 3.2, Seite 45) kommuniziert werden, informieren zu lassen. Der für das Elektrofahrzeug zuständige lokale Observer interessiert sich speziell für manuelle Eingaben, die vom Benutzer über das EMP erfolgt sind, da hierüber der gewünschte Abfahrtszeitpunkt sowie die gewünschte Mindestreichweite des E-Fahrzeugs ebenfalls angegeben werden können. Diese beiden Parameter werden zusammengefasst als ein spezialisiertes `EventExchange`-Objekt übermittelt und können somit vorherige Angaben, die über den Treiber und somit das ISO/IEC 15118-Protokoll gesendet wurden, überschreiben. Die Konfliktsituation zweier Eingabequellen für die Werte bzgl. Abfahrtszeitpunkt sowie Mindestreichweite wurde bereits in Abschnitt 3.3 diskutiert und eine Lösung präsentiert.

Liegen nun alle nötigen Informationen zur flexiblen Einplanung des Elektrofahrzeugs vor, muss ein neues Teilproblem (ein sogenannter `EAPart` für `Evolutionary Algorithm Problem Part`) erzeugt werden, welches dem globalen Observer übermittelt wird. Hierbei müssen u. a. die fahrzeugspezifischen Parameter geeignet kodiert werden, damit der globale Controller, welcher alle gesammelten Teilprobleme vom globalen Observer empfängt, darauf eine Optimierungsstrategie durchführen und somit das auszuführende Gesamtlastprofil berechnen kann. Abschnitt 4.3 wird daher die damit einhergehenden Herausforderungen erläutern und den resultierenden Lösungsansatz motivieren.

## 4.3 Das Optimierungs-Teilproblem Elektrofahrzeug

Eine geeignete Kodierung für die flexible Einplanung des Elektrofahrzeugs als mobilen Energiespeicher und Verbraucher stellt eine größere Herausforderung dar als die Einplanung intelligenter Haushaltsgeräte, wie sie bereits in [3] präsentiert wurde. Im Gegensatz zu einer Waschmaschine oder einem Trockner, deren Lastprofile abhängig vom eingestellten gerätespezifischen Programm stets genau vorhersagbar und oft atomar (also nicht unterbrechbar) sind, kommen beim Elektrofahrzeug weitere variable Parameter zum Tragen.

Dieser Abschnitt wird daher an eine für das Elektrofahrzeug geeignete Kodierung heranzuführen, indem zuerst entscheidende Vorüberlegungen und zu beachtende Restriktionen vorgestellt werden und dann die resultierende Kodierungslösung dargelegt wird.

### 4.3.1 Zu kodierende Parameter und Kodierungsansätze

Würde man das zur Verfügung stehende Elektrofahrzeug (vgl. Abschnitt 3.1) mit voller Leistung (ca. 11 kW) zum Zeitpunkt des Verbindens mit der Ladestation aufladen, so ließe sich ein von aktuellem Ladezustand und Batterietemperatur abhängiges Lastprofil ableiten, welches sich – für Lithium-Ionen-Batterien üblich – in die Konstantstrom- und die Konstantspannungsphase

untergliedert. Das Thema der Approximation des Verlaufs dieser beiden charakteristischen Ladephasen wird in Abschnitt 4.3.6 näher erläutert. Ziel ist jedoch nicht, den Ladevorgang derart zu gestalten, dass die Batterie des Elektrofahrzeugs schnellstmöglich wieder einen Ladezustand von 100 % erreicht, sondern die Ausnutzung der Ladeflexibilität und somit ein nicht-atomares, flexibel gestaltbares Lastprofil.

Insbesondere ist das Fahrzeug in der Lage, neben einer variablen, feingranularen Ladeleistungsbandbreite von 2 kW bis 11 kW auch Energie rückzuspeisen, dies technisch bedingt jedoch nur in den drei vordefinierten Stufen -1,2 kW, -2,5 kW und -4,2 kW. Geht man von einer Leistungsstufen-Granularität von 1 kW bei positiven Leistungswerten aus, so ergeben sich hier 14 verschiedene Leistungsstufen, die Ladepause mit 0 kW mit einberechnet.

Der Abfahrtszeitpunkt, den der Elektromobilist über die Benutzungsschnittstelle im Fahrzeug oder auch das EMP im Smart Home dem Energiemanagement mitteilt, hat darüber hinaus direkten Einfluss auf die Zeitspanne, in der das Elektroauto hinsichtlich der Lade- und Rückspeisephasen flexibel eingeplant werden kann. Eine geeignete Kodierung der Zeitintervalle sollte dafür Sorge tragen, dass der resultierende Bitvektor<sup>3</sup> und somit der Suchraum für den evolutionären Algorithmus nicht zu groß wird, um die Chancen, eine gute Lösung im Rahmen der Iterationen des evolutionären Algorithmus zu finden, nicht zu verringern. Es muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen möglichst feingranularen Zeitintervallen, die das Elektrofahrzeug umso flexibler auf die Last- und Einspeisesituation im Smart Home reagieren lassen, und einer Größenbeschränkung des Bitvektors, damit ein annähernd optimales Gesamtlastprofil in der zur Verfügung stehenden Rechenzeit gefunden werden kann.

Angenommen, man würde ein Zeitintervall von fünf Minuten wählen<sup>4</sup>, dann müsste man bei einer beispielhaften Ankunftszeit von 19 Uhr und einer geschätzten Abfahrtszeit von 7 Uhr am nächsten Morgen insgesamt  $12 \times 12 = 144$  Zeitintervalle kodieren. Rein rechnerisch würden sich somit  $14^{144}$  voneinander verschiedene Lastprofile ergeben, ungültige resultierende Zustände wie eine tiefenentladene oder über die Kapazität hinaus geladene Batterie sowie eine nicht zum Abfahrtszeitpunkt vollständig geladene Batterie mit einberechnet.

Unter der schon in Abschnitt 3.4 begründeten Prämisse, dass die zu kodierenden Parameter durch einen Bitvektor repräsentiert werden, ergeben sich beispielhaft die folgenden vier Kodierungsansätze, welche unterschiedliche Herangehensweisen, Zeitintervalle und Leistungswechsel zu kodieren, untersuchen:

### **Kodierungsschema 1: Leistungskodierung je fixem Zeitintervall**

Um die Länge eines Bitvektors für das Elektrofahrzeug klein zu halten, wird nicht jede mögliche Leistungsstufe kodiert, sondern eine Granularität von 1 kW gewählt, wie es bereits wenige Absätze zuvor motiviert wurde. Somit lassen sich die 14 verschiedenen Leistungswerte mit 4 Bits kodieren, welche bis zu 16 verschiedene Werte repräsentieren können.

Die Leistungswerte eines Zeitintervalls sollten völlig unabhängig von einem benachbarten Zeitintervall kodiert werden können, damit die Möglichkeit gegeben ist, auf einen Ladevorgang mit bspw. 5 kW einen Rückspeisevorgang mit -4,2 kW folgen zu lassen. Dafür müsste ein Bitvektor aus so vielen aneinander gereihten vier-Bit-Blöcken bestehen, wie sich die Standzeit bis zur nächsten Abfahrt in festgelegte Zeitintervalle untergliedern lässt. Ein realistischer Anwendungsfall, der diese Flexibilität rechtfertigt, könnte folgendermaßen aussehen: Aufgrund

---

<sup>3</sup>Siehe Abschnitt 3.4 als Motivation für die Verwendung von Bitvektoren als kodierte Repräsentation der Ladeparameter.

<sup>4</sup>Da die im Testfahrzeug eingebauten Steuerkomponenten das Rückspeisen von Energie erst nach einer Justierungszeit von ca. 2 Minuten aktivieren, ist das fünf-Minuten-Intervall eine naheliegende untere Grenze für eine Zeitspanne, innerhalb derer das Auto sicher auf die Leistungsanforderung reagieren wird.

der Sonneneinstrahlung zur Mittagszeit liefert die PV-Anlage auf dem Dach eine Leistung von 4,6 kW, weshalb das E-Fahrzeug dazu angeleitet wurde, mit bspw. 4 kW zu laden. Wurden nun für einen bestimmten Zeitpunkt mehrere Verbraucher im Voraus eingeplant, wie bspw. die Waschmaschine und der Geschirrspüler, die nebst anderen Verbrauchern mehr Leistung benötigen, als die PV-Anlage bereitstellen kann, so wäre es im Sinne der maximalen Eigenstromnutzung sinnvoll, wenn das E-Fahrzeug seinen Ladevorgang zu diesem Zeitpunkt unterbrechen und sofort Energie rückspeisen würde.

Mit einem Zeitintervall der Größe fünf Minuten würden sich bei einer beispielhaften Ankunftszeit von 19 Uhr abends und einer Abfahrtszeit um 7 Uhr am nächsten Morgen ein Bitvektor der Länge

$$12 \text{ h} \times 12 \times 5 \text{ min} / \text{h} \times 4 \text{ Bits} / 5 \text{ min} = 576 \text{ Bits}$$

ergeben. Ein Vergleich mit Bitvektorenlängen anderer einzuplanender Verbraucher und Erzeuger, die in bisherigen Evaluationen [3] bereits gute Ergebnisse geliefert haben, macht deutlich, dass der Bitvektor des Elektrofahrzeugs um eine Größenordnung größer ist als die der restlichen Haushaltskomponenten. So weist bspw. der Bitvektor einer Waschmaschine ca. 15 Bit, der eines BHKWs ca. 100 Bit und der des resultierenden Individuums – welches sich aus den Bitvektoren aller einzuplanenden Verbraucher und Erzeuger zusammensetzt – ca. 200-250 Bits auf. Allerdings bieten sich bei der Einplanung des Elektrofahrzeugs auch erheblich mehr Kombinationen an, die es zu berücksichtigen gilt, um ein näherungsweise optimales Lastprofil zu finden.

Vor diesem Hintergrund gilt es zu überprüfen, ob die bisherigen Parameter des evolutionären Algorithmus hinsichtlich Populationsgröße, Mutationsrate und Anzahl der Generationen anzupassen sind.

Eine sinnvolle Maßnahme, diesen großen Bitvektor und somit großen Suchraum zu verkleinern, stellt die Reduzierung des Optimierungshorizonts dar. Statt die komplette Zeitspanne von Ankunftszeit bis Abfahrtszeit als flexibles Zeitfenster zu wählen, könnte diese in mehrere Abschnitte aufgeteilt werden. Hierbei muss lediglich im letzten Optimierungszeitfenster, welches den Abfahrtszeitpunkt beinhaltet, darauf geachtet werden, dass die Batterie auch vollgeladen ist. Gerade vor dem Hintergrund, dass aufgrund der Lastsituation im Haus des Öfteren eine erneute Gesamtoptimierung aller Komponenten stattfindet, sobald eine Haushaltskomponente aufgrund einer Nutzerinteraktion neu eingeplant werden muss, ist dieser Schritt akzeptabel und sinnvoll. Es muss lediglich abgewogen werden, wie groß ein solches Optimierungszeitfenster für das Elektrofahrzeug maximal gewählt werden sollte, um gute Ergebnisse hinsichtlich der Zielfunktion zu erreichen.

### **Kodierungsschema 2: Tupel aus Leistung und Startzeitpunkt/Zeitintervalllänge**

Ein weiterer Kodierungsansatz sieht vor, neben der Leistung, mit der geladen oder rückgespeist werden soll, auch die Länge eines entsprechenden Zeitintervalls bzw. den Startzeitpunkt der Leistung zu kodieren. So könnte ein solches Tupel derart gestaltet sein, dass wiederum vier Bits für die Leistungsstufe gewählt werden und eine festgelegte Anzahl an Bits die Länge eines pro Leistungsstufe geltenden Zeitintervalls repräsentiert. Die Länge könnte bspw. als ein Vielfaches von fünf oder zehn Minuten interpretiert werden oder einen minutengenauen Startzeitpunkt innerhalb der zum Laden zur Verfügung stehenden Zeit angeben.

Bei diesem Ansatz gilt es zu bedenken, dass gemäß der Designentscheidung des in Abschnitt 3.2, Seite 45 vorgestellten globalen Optimierers bei der Erstellung eines Teilproblems gleich zu Beginn die Länge des benötigten Bitvektors bekannt gegeben werden muss. Dies könnte

dadurch erreicht werden, dass man die Anzahl der erlaubten Intervalle bzw. Leistungswechsel von vornherein beschränkt. Je mehr die Anzahl der erlaubten Leistungswechsel eingeschränkt wird, desto mehr wird die Flexibilität des mobilen Energiespeichers im Elektrofahrzeug eingeschränkt. Andererseits kann durch eine solche Beschränkung auch einer zu starken Oszillation der Leistungskurve entgegen gewirkt werden. Je weniger man die Leistungswechsel beschränkt, desto mehr nähert sich dieses Kodierungsschema dem ersten Kodierungsschema an.

Nimmt man zum Vergleich des ersten Kodierungsansatzes mit diesem zweiten einen Optimierungshorizont von einer Stunde an, so ergibt sich der folgende maximale Unterschied in der Länge des resultierenden Bitvektors:

Kodierungsschema 1:

$$1 \text{ h} \times 12 \times 5 \text{ min} / \text{h} \times 4 \text{ Bits (für die Leistung)} / 5 \text{ min} = 48 \text{ Bits}$$

Kodierungsschema 2 (mit Zeitintervalllängen):

$$4 \text{ Bits (für die Leistung)} + 4 \text{ Bits (für Vielfache von 5 Minuten)} = 8 \text{ Bits}$$

Kodierungsschema 2 (mit Startzeitpunkten):

$$4 \text{ Bits (für die Leistung)} + 6 \text{ Bits (für Werte von 0 bis 63 min)} = 10 \text{ Bits}$$

Wählt man vier Bits für ein Vielfaches von fünf Minuten, so ergeben sich genau genommen maximal  $16 \times 5 = 80$  Minuten, für die konstant eine Leistung anliegen soll.

Dieser Kodierungsansatz bringt im besten Fall eine deutliche Ersparnis bzgl. der Länge des Bitvektors mit sich, im schlechtesten Fall verdoppelt sich jedoch die Länge des Bitvektors, nämlich genau dann, wenn die vier Bits dezimal den Multiplikator 1 ergeben, womit dann 8 Bits pro 5 Minuten benötigt würden. Dieser ungünstigste Fall lässt sich, wie angesprochen, mit der vorherigen Festlegung auf die maximale Länge des Bitvektors steuern.

### **Kodierungsschema 3: Initiale Leistung gekoppelt mit Leistungswechseln**

In einem dritten Ansatz könnte man lediglich die initiale Ladeleistung mit wiederum vier Bits und für jedes weitere Zeitintervall (bspw. fünf Minuten) den Wechsel der Leistung kodieren. So wäre es eine Alternative, mit jeweils zwei Bit pro Zeitintervall die benachbarten Leistungsstufen +/- 1 kW sowie das Halten der aktuellen Ladeleistung zu repräsentieren. Dies würde auch einer zu starken Oszillation des Ladeprofils entgegenwirken und hätte das bisher im Mittel größte Einsparungspotential hinsichtlich der Länge des Bitvektors. Zieht man als Vergleich wieder den Optimierungshorizont von einer Stunde heran, so ergibt sich mit diesem Kodierungsschema ein Bitvektor der Länge

$$4 \text{ Bits (für die initiale Ladeleistung)} + 12 \times 2 \text{ Bit (für Leistungswechsel / 5 min)} = 28 \text{ Bits.}$$

Die geringe Bitvektorlänge bringt es jedoch auch mit sich, dass dieser Ansatz auch an Flexibilität einbüßt. Bedient man sich wieder des Szenarios eines ladenden E-Fahrzeugs zur Mittagszeit, welches aufgrund der eingeplanten Haushaltskomponenten sofort Energie rückspeisen soll, so würde mit diesem Ansatz (bei einer Granularität des Ladeleistungswechsels von 1 kW und einem Zeitintervall von fünf Minuten) schlechtestenfalls

$$10 \times 1 \text{ Leistungswechsel} \times 5 \text{ min} / \text{Leistungswechsel} = 50 \text{ min}$$

vergehen, um von 11 kW Laden auf -1,2 kW Rückspeisen zu kommen<sup>5</sup>. Würde man die Nachbarschaft eines Leistungswertes derart gestalten, dass als Nachbar der maximalen Ladeleistung 11 kW bei einer Erhöhung der Rückspeisewert -4,2 kW zu wählen ist, so würde sich die Wartezeit aufgrund der nunmehr drei benötigten Leistungswechsel auf 15 min reduzieren, was ebenfalls eine nicht akzeptable Verzögerung mit sich bringen würde.

Man könnte natürlich auch mehr Bits für die Kodierung des Leistungswechsels verwenden, um höhere Leistungssprünge zu erzielen, jedoch stößt man hierbei sehr schnell an die Grenzen einer Verbesserung gegenüber dem ersten Kodierungsschema.

Die drei aufgeführten Kodierungsansätze haben gemein, dass sie neben der Menge an gültigen Lösungskandidaten auch eine Vielzahl an ungültigen Lösungskandidaten produzieren. Ein ungültiger Lösungskandidat ist jener Genotyp, welcher die noch in Abschnitt 4.3.2 vorzustellenden harten Restriktionen bzgl. der vorgegebenen Kapazitätsgrenzen der Batterie und des Ladezustands zum Abfahrtszeitpunkt verletzt, sobald man ihn auf den entsprechenden Phänotyp abbildet. Solche ungültigen Phänotypen müssen dann mittels eines Reparaturmechanismus<sup>7</sup> (siehe Abschnitt 4.3.4) in gültige Phänotypen überführt und evtl. die Korrekturkosten bei der Berechnung der Fitness des Lösungskandidaten mit einbezogen werden.

Anstatt jedoch eine Reparatur bei der Evaluierung eines Lösungskandidaten nach den Kodierungsschemata 1 bis 3 durchzuführen, könnte man rein theoretisch in einem völlig anderen Ansatz gleich von vornherein dafür sorgen, dass nur gültige Lösungskandidaten kodiert werden können. Dieser Ansatz wird nun im folgenden vierten Kodierungsschema diskutiert.

#### Kodierungsschema 4: Vorberechnung gültiger Lösungskandidaten

Die Vorausberechnung gültiger Lösungskandidaten stellt ein kombinatorisches Problem dar. Sind durch eine Berechnungsfunktion erst einmal alle gültigen Lösungskandidaten gefunden, so könnten diese in einer geeigneten Datenstruktur abgespeichert werden. Eventuelle Strafkosten, welche bei der Verletzung weicher Restriktionen, wie sie in Abschnitt 4.3.2 eingeführt werden, entstehen, müssten zur zusätzlichen Bewertung der Güte ebenfalls berücksichtigt werden.

Der Genotyp würde in diesem Fall nicht ein mögliches Lastprofil kodieren, sondern stattdessen z. B. eine gültige Lösung innerhalb der Datenstruktur indexieren. Man hätte somit eine *indirekte Kodierung* geschaffen. Um jedoch die gleiche Granularität an Lösungskandidaten wie bspw. bei Kodierungsschema 1 erzeugen zu können, müsste man insgesamt  $14^{144}$  Lösungskandidaten vorausberechnen und auf ihre Validität hinsichtlich der harten Restriktionen überprüfen, um zu einem geeigneten Lastprofil für das Elektroauto zu gelangen. Dieser Wert berechnet sich aus einer vergleichbaren Standzeit über Nacht von 12 Stunden, einer Intervalldauer von fünf Minuten ( $\cong 12$  Intervallen pro Stunde) und 14 möglichen Leistungsstufen pro Intervall. Umgerechnet müsste man somit mit maximal 549 Bits ( $14^{144} = 2^{549}$ ) die entsprechenden Lösungskandidaten kodieren. Selbst wenn nur 1 % der Lösungskandidaten valide wären und man die Anzahl der Leistungsstufen sowie den Optimierungshorizont – bspw. auf drei Stunden – reduzieren würde, so würde dies immer noch einen immens großen Rechenaufwand bedeuten, der für den vorgestellten Einsatzzweck schlichtweg zu groß wäre.

Es ließe sich andererseits auch argumentieren, dass nicht alle möglichen validen Lösungskandidaten im Voraus berechnet werden müssen, sondern nur der entsprechende Lösungskandidat, auf den der dezimale Wert des 549 Bit langen Bitvektors zeigt, im Sinne einer *lazy evaluation*<sup>6</sup>

<sup>5</sup>Dieses Beispiel geht von der folgenden Nachbarschaft der Leistungswerte aus: -4,2 kW  $\rightarrow$  -2,5 kW  $\rightarrow$  -1,2 kW  $\rightarrow$  0 kW  $\rightarrow$  1 kW  $\rightarrow$  ...  $\rightarrow$  11 kW

<sup>6</sup>Hierbei wird das Ergebnis eines auszuwertenden Ausdrucks nur so weit berechnet, wie es für das entsprechende

gezielt berechnet wird. Somit hätte man den unverhältnismäßig großen Rechenaufwand a priori vermieden. Eine Herausforderung besteht sodann darin, eine Berechnungsvorschrift (bspw. in Form eines endlichen Automaten) für diese gezielte Berechnung zu formulieren.

Bei dieser Art der Kodierung muss ebenso besonderes Augenmerk auf die Sortierung der gefundenen Lösungskandidaten geworfen werden. Dies gilt insbesondere, da infolge einer Mutation eine evtl. benachbarte Lösung nicht zu stark von der vorherigen Lösung abweichen sollte, damit die Mutation ihre Wirkung entfalten kann. Es müsste somit zuvor ein sinnvolles Distanzmaß benachbarter Lösungskandidaten definiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der erste Kodierungsansatz gewählt, welcher im weiteren Verlauf aufgegriffen und genauer vorgestellt wird.

Neben den Überlegungen zur Kodierung der einzelnen Leistungsstufen und Zeitintervalle, ergeben sich zusätzlich Randbedingungen, die für eine geeignete Kodierung bzw. deren Bewertung beachtet werden müssen und im Folgenden nun erläutert werden.

### 4.3.2 Restriktionen der Ladeflexibilität

Ein Teilproblem (vgl. Abschnitt 3.2) definiert u. a. die Länge des Bitvektors, welcher für die initiale Population zufällig belegt, im Laufe der Rekombinations- sowie Mutationsoperationen mehrfach verändert und in jedem Kreislauf der Evaluation zugeführt wird. Es ist der Zufälligkeit der Bitbelegung geschuldet, dass die Transformation dieses Genotyps in ein entsprechendes Lastprofil (der Phänotyp) gewisse *weiche* wie auch *harte Restriktionen* verletzt. Insbesondere die Verletzung harter Restriktionen führt dazu, dass eine solche Genotyp-Phänotyp-Abbildung ein ungültiges Lastprofil erzeugen würde, welches korrigiert werden muss. Als weiche Restriktionen sind die vier Aspekte Oszillationen, vorzeitige Vollladung der Batterie, niedrige Ladeleistungswerte sowie sinnvolle Rückspeisung zu nennen.

#### Oszillationen

Aufgrund des Zufälligkeitsfaktors kann der häufige Fall auftreten, dass die Bitvektorabschnitte, die die jeweils benachbarten Intervalle kodieren, sehr oft unterschiedliche Werte annehmen und es somit zu einer letzten Endes recht starken Oszillation des resultierenden Lastprofils des Elektrofahrzeugs kommt. Es ist möglich, aber nicht durchweg anzunehmen, dass die Lastsituation im Smart Home derart schwankend ist, dass alle fünf Minuten das Fahrzeug neu reagieren muss. Dieser Annahme folgend wäre es eventuell von Vorteil, in die Kodierung einen Mechanismus einzufügen, welcher diese Oszillation wenn nötig begrenzt.

Bedenkt man den ständigen Wechsel zwischen Entlade- und kurzen Wiederaufladephasen durch Bremsenergieerückgewinnung (Rekuperation) im Fahrmodus, so ist zumindest eine – im extremsten Fall – alle fünf Minuten wechselnde Leistungsstufe kein Faktor, der als besonders batteriealternd gewertet und somit diesbezüglich vernachlässigt wird.

Diesen oszillierenden Leistungswechseln könnte man folgendermaßen begrenzend begegnen:

1. Man integriert in die Logik des Teilproblems einen einfachen Zustandsübergangsautomaten, welcher nur aus der Kombination des aktuellen Lade- bzw. Rückspeisezustands und einer bestimmten Bitbelegung einen Leistungswechsel erlaubt.

---

Programm gerade zielführend und nötig ist. Diese Berechnungsstrategie bringt eine erhebliche Zeitersparnis mit sich.

2. Man erweitert die Leistungskodierung um bspw. ein Bit und bildet alle weiteren Bitkodierungen auf die Leistungsstufe 0 kW ab, sodass das Fahrzeug in selteneren Fällen lädt oder rückspeist.
3. Man wählt eine Kombination der Ansätze 1 und 2.

#### **Vorzeitige Vollladung der Batterie**

Der Ladezustand (SOC) der Batterie eines Elektrofahrzeugs kann nicht genau gemessen, sondern lediglich mittels verschiedener Verfahren durch das Batteriemanagementsystem (BMS) geschätzt werden. In diesen Verfahren fließt jedoch stets die Messung der Zellspannung mit ein. Ein hoher Ladezustand geht stets mit einer hohen Zellspannung einher, welches nachweislich den Alterungsprozess der Batterie beschleunigt [63]. Konkret bedeutet dies, dass die Batterie umso schneller altert, je länger die Batterie auf einem hohen Ladezustand verweilt. Daher wäre es im Sinne einer hohen Batterielebensdauer (und somit geringeren Gesamtkosten für die Batterie) sinnvoll, den Zeitpunkt des Vollladens der Batterie möglichst weit zum Abfahrtszeitpunkt hin zu verschieben.

Es gibt jedoch noch keine aussagekräftigen Studien, die belegen, in welchem Maß dieser Alterungsprozess aufgrund hoher Batteriespannung zu Buche schlägt. Es mag durchaus Sinn ergeben, das Elektrofahrzeug noch vor dem Abfahrtszeitpunkt vollzuladen, nämlich genau dann, wenn bspw. kostenlos produzierter Strom aus der PV-Anlage zur Verfügung steht.

Da gemäß der Designentscheidung des globalen Optimierers zum Zeitpunkt der Evaluation eines Bitvektors (siehe `evaluate()` aus Abbildung 3.3) das jeweilige Teilproblem keine Kenntnis über die aktuelle PV-Einspeisung oder den Strompreis hat, wird ein vorzeitiger Ladevorgang generell schlechter bewertet als ein Ladevorgang nahe des Abfahrtszeitpunkts.

#### **Niedrige Ladeleistungswerte**

Die diversen Nebenverbraucher im Elektrofahrzeug, seien es die Klimaanlage bzw. die Heizung bei einer thermischen Vorkonditionierung des Pkw-Innenraums, das Ladesteuergerät selbst oder andere Hilfsaggregate, benötigen ihrerseits einen gewissen Anteil der Leistung, die zum Laden der Batterie aus dem Netz bezogen wird. Zusammen mit dem Verlust der elektrischen Energie, der bei der Wandlung des elektrischen Stroms in chemisch gespeicherte Energie der Batterie auftritt, führt dies dazu, dass sich der Wirkungsgrad verschlechtert. Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis von aus dem Netz bezogener Energie zu der Energie, die letztlich in der Batterie gespeichert wird. Je geringer nun die eingestellte Ladeleistung ist, desto geringer ist prozentual gesehen auch der Wirkungsgrad der bezogenen Leistung.

Andererseits tragen vor allem die drei Faktoren hohe Batteriespannung, hohe Ladeleistung sowie eine (sehr) hohe Batterietemperatur, wie sie auch durch eine hohe Ladeleistung induziert wird, in ausschlaggebendem Maße zur Batteriealterung bei, wie in Abschnitt 4.3.6 noch ausführlicher erläutert wird. Vor diesem Hintergrund lässt sich nicht eindeutig sagen, ob höhere Ladeleistungen generell geringeren vorzuziehen sind oder umgekehrt. Im Rahmen dieser Arbeit fällt die Entscheidung auf die Bevorzugung hoher Ladeleistungen.

#### **Sinnvolle Rückspeisung**

Die Rückspeisung von Energie aus der Batterie sollte nur dann erfolgen, wenn die Lastsituation im Smart Home dies erfordert. Aufgrund der Zufälligkeit des durch den EA generierten Bitvektors können jedoch bei der Abbildung auf den Phänotyp Rückspeiseintervalle auftreten, die nicht immer mit der Hauslast korrelieren. Daher müssen Rückspeisevorgänge mit einem geeigneten Strafwert versehen werden, damit dieser Energiefluss nur in wirklich sinnvollen

Zeitintervallen erfolgt. Dieser Strafwert stellt eine sehr sensible Stellschraube dar, wie in Abschnitt 6.2 noch erläutert werden wird.

Wie in Abschnitt 3.2, Seite 45 bereits erwähnt, wird dem globalen Optimierer neben der resultierenden Lastkurve ebenso ein optionaler Bewertungsfaktor mitgegeben, welcher die Güte des Genotyps zusätzlich beeinflussen kann und durch eine geschickte Gewichtung der Verletzung der weichen Restriktionen errechnet wird. Denkbar wäre auch ein Distanzmaß, welches beschreibt, wie weit eine vorgeschlagene Lösung in Form einer phänotypischen Lastkurve von einer gültigen Lösung abweicht. Dieses Distanzmaß würde durch die Verletzung harter Restriktionen gebildet, die in jedem Fall korrigiert werden müssen. Es gibt hierbei eine Vielzahl gültiger Lösungen, ein praktisches Beispiel für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Korrekturmechanismen für harte Restriktionsverletzungen ist in Abschnitt 4.3.4 gegeben. Für das Elektrofahrzeug gelten insbesondere folgende harte Restriktionen, welche bei der Genotyp-Phänotyp-Abbildung zu berücksichtigen sind:

#### **Minimale Reichweite**

Die vom Fahrzeugnutzer vorgegebene minimale Reichweite muss beim Verbinden des Elektrofahrzeugs mit der Ladestation so schnell wie möglich durch einen Ladevorgang erreicht werden, sofern mit dem aktuellen Ladezustand diese Strecke nicht zurückgelegt werden kann. Eine vorgegebene minimale Reichweite gibt dem Elektromobilisten eine gewisse Sicherheit, kritische Distanzen (z. B. zum nächstgelegenen Krankenhaus) auf jeden Fall zu erreichen. Sobald die minimale Reichweite gegeben ist, darf das Fahrzeug bis zum Abfahrtszeitpunkt flexibel eingeplant werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Mindestreichweite in keinem der kodierten Zeitintervalle durch einen Rückspeisevorgang unterschritten wird.

#### **Batteriekapazitätsbeschränkung**

Die Batterie kann nicht über ihre Kapazität hinaus mit Energie aufgeladen werden. Ebenso kann nicht mehr Energie rückgespeist werden, als in der Batterie gespeichert ist. Dies wird durch die erste Restriktion (Minimale Reichweite) bereits verhindert, wird der Vollständigkeit halber aber hier noch einmal erwähnt. Daher ist darauf zu achten, dass das resultierende Lastprofil diese physikalische Restriktion ebenfalls reflektiert und somit stets einen durchführbaren Ladefahrplan darstellt.

#### **Vollgeladenes Elektrofahrzeug**

Sofern die zur Verfügung stehende Zeit ausreicht, muss das Fahrzeug spätestens zum Abfahrtszeitpunkt den gewünschten Ladezustand erreichen.

#### **Maximale und minimale Ladeleistungen**

Im Fahrzeug selbst ist über eine Benutzungsschnittstelle stets einstellbar, welche maximale ( $\leq 11$  kW) und minimale ( $\geq 2$  kW) Ladeleistung für einen Ladevorgang zur Verfügung stehen soll. Wie bereits erwähnt, ist das Fahrzeug technisch dazu in der Lage, mit einer Leistungsbandbreite von 2 bis 11 kW zu laden, jedoch sollte stets eine eventuell einschränkende Benutzereingabe berücksichtigt werden.

Eine mathematische Abbildung dieser Restriktionen wurde bereits in [46] begonnen und soll im folgenden Abschnitt 4.3.3 aufgegriffen werden, um die nötige Korrektur eines vorgeschlagenen Lastprofils formal darstellen zu können.

Tabelle 4.1: Abbildung ISO/IEC 15118-2 Parameter auf formales Modell (erweiterte Parameter durch Unterstreichen gekennzeichnet)

Param	Ladeparameter [Einheit]	Formale Abbildung
1	DepartureTime [s]	$t_d \geq 0$
2	EAmount [Wh]	$E_{EV}^+(t) > 0$
3	<u>EAmountDischarge [Wh]</u>	$E_{EV}^-(t) \in \mathbb{R}$
4	EVMaxCurrent [A]	$p_{EV,max}^+ > 0$
5	EVMinCurrent [A]	$p_{EV,min}^+ > 0$
6	<u>EVMaxCurrentDischarge [A]</u>	$p_{EV,max}^- < 0$
7	<u>EVMinCurrentDischarge [A]</u>	$p_{EV,min}^- < 0$
8	EVSEMaxCurrent [A]	$p_{EVSE,max}^+ > 0$
9	EVSEMinCurrent [A]	$p_{EVSE,min}^+ > 0$
10	<u>EVSEMaxCurrentDischarge [A]</u>	$p_{EVSE,max}^- < 0$
11	<u>EVSEMinCurrentDischarge [A]</u>	$p_{EVSE,min}^- < 0$
12	PMaxSchedule [(s, W)]	$\{(t_i, p_{EV_i}) \mid i \in [n]\}$
13	Dauer des letzten Zeitintervalls von PMaxSchedule [s]	$d > 0$

### 4.3.3 Formale Darstellung der kodierten Parameter und Restriktionen

Zur Erstellung eines für das Elektrofahrzeug gültigen Lastprofils bedarf es der Einbeziehung diverser Parameter aus der (erweiterten<sup>7</sup>) ISO/IEC 15118-2 Spezifikation, welche in Tabelle 4.1 zusammengefasst und auf Variablen für das zu erstellende formale Modell abgebildet sind. Manche der gelisteten Parameter sind unterstrichen, was bedeutet, dass diese noch nicht Einzug in die ISO/IEC 15118-2 Spezifikation gefunden haben, sondern eine projektspezifische Erweiterung der Norm darstellen, um beispielsweise eine Rückspeisung zu ermöglichen. Für die Nominalspannung existieren in der ISO/IEC 15118-2 ebenfalls Parameter, welche aber in Tabelle 4.1 nicht aufgeführt sind. Stattdessen wurden Ladestromparameter (mit der Einheit Ampere) gleich den entsprechenden Leistungsparametern zugeordnet, basierend auf der physikalischen Berechnungsvorschrift  $P = U \cdot I$ . Sämtliche Parameter werden im Laufe des Abschnitts näher erläutert.

$T_{EV} = [t_p, t_d]$  sei definiert als der Zeitraum zwischen dem Verbinden des Elektrofahrzeugs mit der Ladestation (Zeitpunkt  $t_p$ ) und einem benutzerdefinierten Abfahrtszeitpunkt  $t_d$  (siehe Param 1 aus Tabelle 4.1), wobei  $t_p \leq t_1$  (der Lade- bzw. Rückspeisevorgang kann zeitlich versetzt zum Einstecken des Ladekabels stattfinden) und  $t_n + d \leq t_d$  (Batterie kann vor dem Abfahrtszeitpunkt bereits voll aufgeladen sein).

Das gültige Lastprofil (siehe Param 12) ist gegeben als Funktion über die Zeit bestehend aus Tupeln mit jeweiligen Zeitpunkten  $t_i$ , die den Beginn eines Zeitintervalls markieren, und den in den jeweiligen Zeitintervallen maximal gültigen Leistungswerten  $p_{EV_i}$ . Die Länge eines jeweiligen Zeitintervalls mit Beginn  $t_i$  ist begrenzt durch den Beginn  $t_{i+1}$  des darauffolgenden Zeitintervalls. Die Länge des letzten Zeitintervalls ist gegeben durch die Zeitdauer  $d$  (siehe Param 13). Der Wert des Index  $n$  kann hierbei frei gewählt werden, sodass ein sehr feingranulares

<sup>7</sup>Erweitert im Sinne der Beschreibung aus Abschnitt 4.2, Seite 57

Lastprofil dem Fahrzeug übermittelt werden kann<sup>8</sup>.

Die Länge eines Zeitintervalls  $\Delta t_i$  mit Beginn  $t_i$  für alle  $t_i \in T_{EV}$ ,  $i \in [n]$  wird somit definiert als

$$\Delta t_i = \begin{cases} (t_{i+1} - t_i) & \text{falls } 1 \leq i < n, \\ d & \text{falls } i = n. \end{cases} \quad (4.1)$$

Die Leistung  $p_{EV,i}$ , mit der das Fahrzeug im  $i$ -ten Zeitslot laden oder rückspeisen soll, definiert sich u. a. über die Parameter 4 bis 11 aus Tabelle 4.1. Für alle  $i \in [n]$  und  $t \in T_{EV}$  gilt, dass

$$p_{EV,i} \in [p_{max}^-(t), p_{min}^-] \cup \{0\} \cup [p_{min}^+, p_{max}^+(t)], \quad (4.2)$$

wobei

$$p_{min}^- = \max(p_{EV,min}^-, p_{EVSE,min}^-), \quad (4.3)$$

$$p_{max}^-(t) = \min(p_{EV,max}^-, p_{EVSE,max}^-, p_{GRID,max}^-(t)), \quad (4.4)$$

$$p_{min}^+ = \max(p_{EV,min}^+, p_{EVSE,min}^+), \text{ und} \quad (4.5)$$

$$p_{max}^+(t) = \min(p_{EV,max}^+, p_{EVSE,max}^+, p_{GRID,max}^+(t)). \quad (4.6)$$

$p_{EV,max}^-$  und  $p_{EVSE,max}^-$  stehen für die maximal mögliche Rückspeiseleistung des Fahrzeugs (EV) beziehungsweise der Ladestation (EVSE), im Gegensatz zur max-Funktion aus (4.3) und (4.5). Die Werte für  $p_{EV,min}^-$  und  $p_{EVSE,min}^-$  sind entsprechend zu interpretieren.

$p_{GRID,max}^+(t)$  und  $p_{GRID,max}^-(t)$  stehen hierbei für netzseitig vorgegebene Leistungsgrenzen für das Laden (+) respektive Rückspeisen (-) von Energie. Wie in Abschnitt 3.2 bereits eingeführt, werden in die Optimierung des Gesamtlastprofils auch Lastbegrenzungssignale mit eingebunden. Genau genommen handelt es sich hier aber nicht um harte Lastgrenzen, die keinesfalls überschritten werden dürfen, ohne dass es zu einem Lastabwurf kommt, sondern um weiche Lastgrenzen, deren Überschreitung lediglich erhebliche Strafkosten bei der Fitnessbewertung eines Individuums nach sich ziehen.

$E_{EV}(t)$  sei definiert als die zu jedem Zeitpunkt  $t_i \in T_{EV}$  in der Batterie gespeicherte Energie. Die initialen Werte für die vom Fahrzeug benötigte Energiemenge  $E_{EV}^+(t_p)$  (siehe Param 2) und die zur Rückspeisung zur Verfügung stehende Energiemenge  $E_{EV}^-(t_p)$  (siehe Param 3) verändern sich über die Zeit wie in (4.7) und (4.8) dargestellt. Sei  $k$  der größte Index, sodass  $t_p \leq t_k \leq t \leq t_d$ , dann gilt:

$$E_{EV}^+(t) = E_{EV}^+(t_p) - \sum_{i=1}^{k-1} (p_{EV,i} \cdot \Delta t_i) - p_{EV,k} \cdot (t - t_k) \quad (4.7)$$

$$E_{EV}^-(t) = E_{EV}^-(t_p) + \sum_{i=1}^{k-1} (p_{EV,i} \cdot \Delta t_i) + p_{EV,k} \cdot (t - t_k) \quad (4.8)$$

Hierbei können die  $p_{EV,i}$  sowohl positive (laden) als auch negative (rückspeisen) Leistungswerte annehmen. Auch  $p_{EV,k}$  kann theoretisch beide Vorzeichen annehmen, es ist jedoch

<sup>8</sup>Laut der offiziellen ISO/IEC 15118-2 Spezifikation ist die Anzahl der Tupel auf den Wert 1024 begrenzt.

davon auszugehen, dass in der Regel das letzte Intervall des Lastprofils einen Ladevorgang widerspiegelt, um die Batterie des Fahrzeugs zum Abfahrtszeitpunkt hin vollzuladen.

$Capa_t$  sei definiert als die vom Fahrer nutzbare Kapazität einer vollgeladenen Batterie<sup>9</sup>,  $Capa_p$  als die aktuell zur Verfügung stehende Kapazität zum Zeitpunkt  $t_p$  und  $Capa_u$  als die benutzerdefinierte Mindestkapazität<sup>10</sup>, welche direkt die rückspeisefähige Energiemenge (Param 3) beeinflusst. Die zum Zeitpunkt  $t_p$  benötigte Energiemenge lässt sich somit auch ausdrücken als

$$E_{EV}^+(t_p) = Capa_t - Capa_p + \alpha, \quad (4.9)$$

die rückspeisefähige Energiemenge hingegen als

$$E_{EV}^-(t_p) = Capa_p - Capa_u - \alpha. \quad (4.10)$$

Die Variable  $\alpha \in \mathbb{R}$  bezeichnet hierbei die zusätzliche Energie, welche durch die Nebenverbraucher und den Wirkungsgrad des Wechselrichters ( $< 100\%$ ) benötigt wird. Ein positiver Wert für  $E_{EV}^-(t)$  reflektiert die zur Rückspeisung zur Verfügung stehende Energiemenge, wohingegen ein negativer Wert einen sofortigen Ladebedarf signalisiert, bis die Energie zur Erreichung der vorgegebenen Mindestreichweite geladen wurde.  $E_{EV}^+(t)$  hingegen ist stets ein positiver Wert.

Abbildungen 4.2 und 4.3 dienen zur Veranschaulichung der diversen Kapazitäts- und Energiekennwerte. Da bei Abbildung 4.2 der Ladezustand der Batterie zum Zeitpunkt  $t_p$  bei 28%

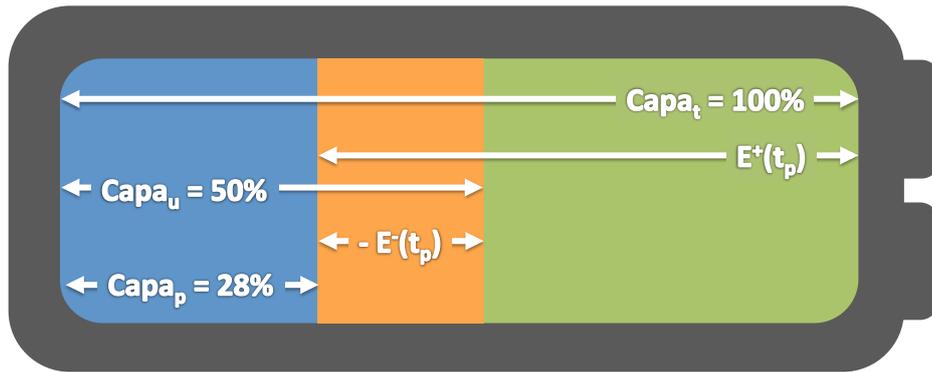


Abbildung 4.2: Kapazitäts- und Energiekennwerte zum Zeitpunkt  $t_p$ : Beispiel mit negativem  $E_{EV}^-(t_p)$

liegt und der Nutzer eine Mindestreichweite vorgegeben hat, die 50% der gesamten nutzbaren Batteriekapazität entspricht, muss sofort ein Ladeprozess mit der maximal verfügbaren Leistung initialisiert werden, bis  $Capa_p \geq Capa_u$  und der negative  $E_{EV}^-(t_p)$  Wert somit einen positiven Wert erreicht. In Abbildung 4.3 hingegen liegt der Ladezustand zum Zeitpunkt  $t_p$  bei 70%, ist somit größer als der eingestellte Mindestladezustand mit 40% und ermöglicht die sofortige flexible Einplanung des Fahrzeugs.

<sup>9</sup>Es wird von Seiten des Batterieherstellers stets zwischen der Gesamtkapazität einer Traktionsbatterie und der für den Nutzer des Fahrzeugs zur Verfügung stehenden Batteriekapazität unterschieden. Letztere ist stets geringer als die Gesamtkapazität, um schädigende Tiefenentladungen oder zu hohe Ladezustände zu vermeiden und so eine lange Lebensdauer der Batterie zu garantieren.

<sup>10</sup>Die Benutzungsschnittstelle im Elektrofahrzeug bietet die Angabe eines minimalen SOC (Batterieladezustand in Prozent), das EMP ermöglicht die Angabe einer Mindestreichweite in km. Beide Werte können jedoch unter Einbeziehung der fahrzeugspezifischen Batteriekapazität in kWh-Werte und somit  $Capa_u$  umgerechnet werden.

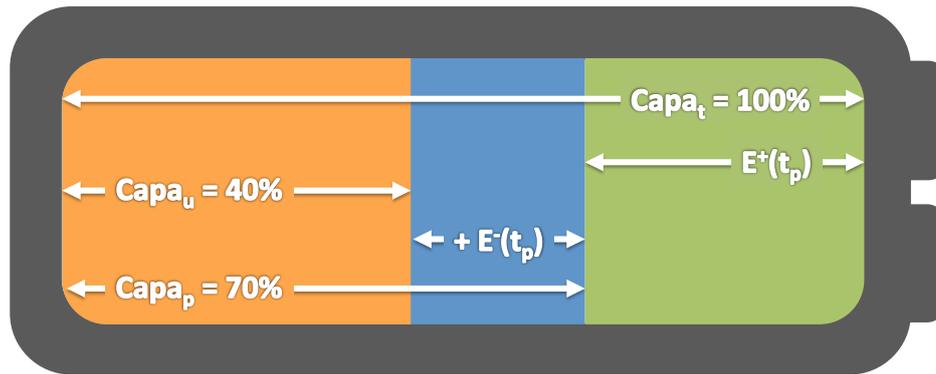


Abbildung 4.3: Kapazitäts- und Energiekennwerte zum Zeitpunkt  $t_p$ : Beispiel mit positivem  $E_{EV}^-(t_p)$

Die Restriktionen, welche bei der Korrektur eines vom globalen Controller vorgeschlagenen Lastprofils – resultierend aus der Genotyp-Phänotyp-Abbildung des evolvierten Bitvektors – beachtet werden müssen, sind in den Formeln (4.3) bis (4.6) sowie (4.11) bis (4.15) dargestellt.

$$0 \leq E_{EV}^+(t) \leq Capa_t + \alpha, \quad (4.11)$$

$$E_{EV}^+(t_d) = 0, \quad (4.12)$$

$$E_{EV}(t_m) - (E_{EV}(t_m) - Capa_u) \leq E_{EV}(t_s), \quad (4.13)$$

$$Capa_t > 0, \quad (4.14)$$

$$Capa_u, Capa_p \geq 0. \quad (4.15)$$

Restriktion (4.11) besagt, dass die benötigte Energiemenge (Param 2) niemals die Kapazität der Batterie samt benötigter Energie für die Nebenverbraucher übersteigt. Somit kann die insgesamt über  $T_{EV}$  hinweg geladene Energiemenge – nach Abzug der rückgespeisten Energiemenge – diese Grenze nie überschreiten. Zum Abfahrtszeitpunkt  $t_d$  muss das Elektrofahrzeug eine vollständig geladene Batterie aufweisen<sup>11</sup>, was durch (4.12) zum Ausdruck gebracht wird.

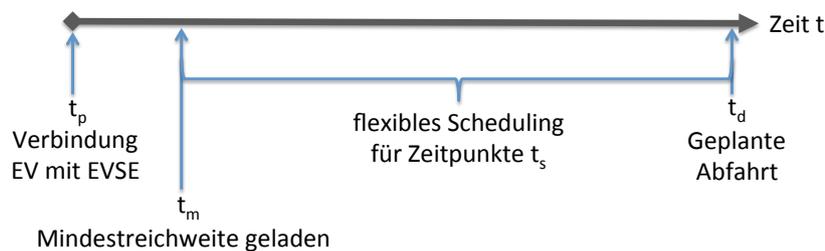


Abbildung 4.4: Übersicht über die Zeitpunkte  $t_p$ ,  $t_m$ ,  $t_s$  und  $t_d$

Wie bereits erwähnt, muss nach Verbinden des E-Fahrzeugs mit der Ladestation sofort ein Ladevorgang starten, falls die noch gespeicherte Energiemenge nicht zur Zurücklegung der Mindestreichweite ausreicht. Diese für die Mindestreichweite evtl. noch benötigte Energiemenge

<sup>11</sup>Theoretisch könnte dem Fahrer auch ein geringerer Ladezustand zum Abfahrtszeitpunkt genügen, dies wurde jedoch im Rahmen der Projektdurchführung und Evaluation nicht berücksichtigt.

sei mit  $E_{EV}(t_m)$  (m für Mindestreichweite) gekennzeichnet, wobei  $t_p \leq t_m \leq t_s \leq t_d$  gilt. Hat hingegen das Fahrzeug bereits zu Beginn  $t_p$  die nötige Energiemenge gespeichert, so kann ein flexibles Scheduling zu den Zeiten  $t_s$  (s für Scheduling) stattfinden. Jedoch ist bei der flexiblen Einplanung stets zu beachten, dass bei einem Rückspeisevorgang die im Fahrzeug gespeicherte Energiemenge niemals  $E_{EV}(t_m)$  unterschreitet, wie in (4.13) beschrieben. Der Zusammenhang zwischen den diversen Zeitpunkten ist in Abbildung 4.4 noch einmal klar herausgestellt.

Letzten Endes dürfen gemäß (4.14) und (4.15) die Kapazitätswerte nicht negativ sein.

#### 4.3.4 Beispiel der Korrektur eines Bitvektors im Teilproblem

Um die nötigen Korrekturmechanismen innerhalb eines Teilproblems anschaulicher zu illustrieren, soll an dieser Stelle ein fiktives Beispiel herangezogen werden. Es seien folgende Werte zum Zeitpunkt  $t_p$  gegeben:

- Anschlusszeitpunkt  $t_p = 17:15$
- Geplanter Abfahrtszeitpunkt  $t_d = 19:30$
- Batteriekapazität  $Capa_t = 12 \text{ kWh}$
- SOC = 20 % ( $\cong 2,4 \text{ kWh}$ )
- Benötigte Energiemenge  $E_{EV}^+(t_p) = 9,6 \text{ kWh}$
- Mindestreichweite (in % SOC) = 40 % ( $\cong 4,8 \text{ kWh } Capa_u$ )
- Rückspeisefähige Energiemenge  $E_{EV}^-(t_p) = -2,4 \text{ kWh}$
- Maximale Ladeleistung  $p_{max}^+ = 11 \text{ kW}$
- Minimale Ladeleistung  $p_{min}^+ = 2 \text{ kW}$
- Maximale Rückspeiseleistung  $p_{max}^- = -4,2 \text{ kW}$
- Minimale Rückspeiseleistung  $p_{min}^- = -1,2 \text{ kW}$

Aus den Ausgangsdaten geht hervor, dass zum Zeitpunkt  $t_p$  ein sofortiger Ladevorgang unabdingbar ist, um die  $-2,4 \text{ kWh}$  auszugleichen und somit die Mindestreichweite so schnell wie möglich gewährleisten zu können. Da zu Beginn das Fahrzeug also nicht flexibel vom EMS einplanbar ist, fließt die Zeitspanne, in der die Batterie konstant mit  $11 \text{ kW}$  geladen werden muss, nicht in die Länge des Bitvektors mit ein. Dies bedeutet, dass dem globalen Observer zu Beginn ein statisches Lastprofil kommuniziert wird, auf Basis dessen nach (4.16) aufgerundet 14 Minuten lang mit  $11 \text{ kW}$  geladen werden muss.

$$\begin{aligned}
 2400 \text{ Wh} &= (11000 \text{ W} \times x \text{ min} \times 60 \text{ s/min}) \div 3600 \text{ s} & (4.16) \\
 x \text{ min} &= (2400 \text{ Wh} \times 3600 \text{ s}) \div (11000 \text{ W} \times 60 \text{ s}) \\
 x &= 13,09 \text{ min}
 \end{aligned}$$

Ist diese Zeitspanne abgelaufen, wird dem globalen Observer ein neues Teilproblem kommuniziert. Wählt man nun wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben den Ansatz, 14 verschiedene Leistungsstufen mit 4 Bits zu kodieren, entscheidet sich aber für ein minimales Zeitintervall von 15 Minuten, so ergibt sich für das Teilproblem Elektroauto ein Bitvektor der Länge

4 Bits pro Intervall  $\times$  4 Intervalle pro Stunde  $\times$  2 Stunden = 32 Bits.

Ein erster Ansatz für die Abbildung eines 4-Bit-Strings auf reale Leistungswerte könnte wie in Tabelle 4.2 aussehen.

Tabelle 4.2: Abbildung eines Bitvektors der Länge vier auf Leistungswerte [kW]

Bitvektor	Leistung [kW]	Bitvektor	Leistung [kW]
0000	-4,2	1000	5
0001	-2,5	1001	6
0010	-1,2	1010	7
0011	0	1011	8
0100	1	1100	9
0101	2	1101	10
0110	3	1110	11
0111	4	1111	0

Anhand der Abbildung 4.5 wird der Zusammenhang zwischen einem Bitvektor (dem Genotyp) und der resultierenden Lastkurve (dem Phänotyp) nach Anwendung der Tabelle 4.2 grafisch dargestellt und der Korrekturmechanismus gemäß der bereits erwähnten Restriktionen erläutert. Nach dem initialen Ladevorgang zur Gewährleistung der Mindestreichweite ist nun der Energiegehalt von  $2,4 \text{ kWh} + 2,567 \text{ kWh} = 4,967 \text{ kWh}$  in der Batterie gespeichert. Der Korrekturmechanismus läuft nun in zwei Stufen ab.

1. Überprüfe für jedes Zeitintervall, ob die jeweilige mit vier Bits kodierte Leistungsanforderung
  - a) zu einer Unterschreitung der für die Mindestreichweite nötigen Energiemenge oder
  - b) zu einer Überladung der Batterie
 führen würde. Falls einer der beiden Fälle eintritt, überprüfe, ob eine kleinere Rückspeise- bzw. Ladestufe die jeweilige Restriktion nicht verletzt und wähle diese Leistungsstufe für das konkrete Zeitintervall. Falls keine alternative Leistungsstufe gewählt werden kann, dann lege eine Ladepause mit 0 kW ein.
  
2. Sobald der Genotyp einmal abgearbeitet wurde, überprüfe, ob die Batterie zum Abfahrtszeitpunkt nicht vollgeladen sein würde und korrigiere die Leistungsanforderungen pro Zeitintervall entsprechend. Hierbei ist eine gangbare Methode, die Leistungswerte von der Abfahrtszeit aus chronologisch rückwärts gehend nach oben zu korrigieren, um gemäß der weichen Restriktionen eine vorzeitige Vollladung der Batterie zu vermeiden.

Das Ergebnis dieses Korrekturmechanismus' kann im folgenden zeitlichen Ablauf nachverfolgt werden.

- 17:30  $-4,2 \text{ kW} \hat{=} -1050 \text{ Wh} \rightarrow$  unterschreitet Mindestreichweite  
 $\Rightarrow$  da  $-1,2 \text{ kW}$  ebenfalls nicht zulässig, keine Rückspeisung (Energielevel =  $4,967 \text{ kWh}$ )
- 17:46  $0 \text{ kW} \hat{=} 0 \text{ Wh} \rightarrow$  keine Restriktionsverletzung, Restzeit ausreichend zum Vollladen  
 $\Rightarrow$  keine Aktion (Energielevel =  $4,967 \text{ kWh}$ )

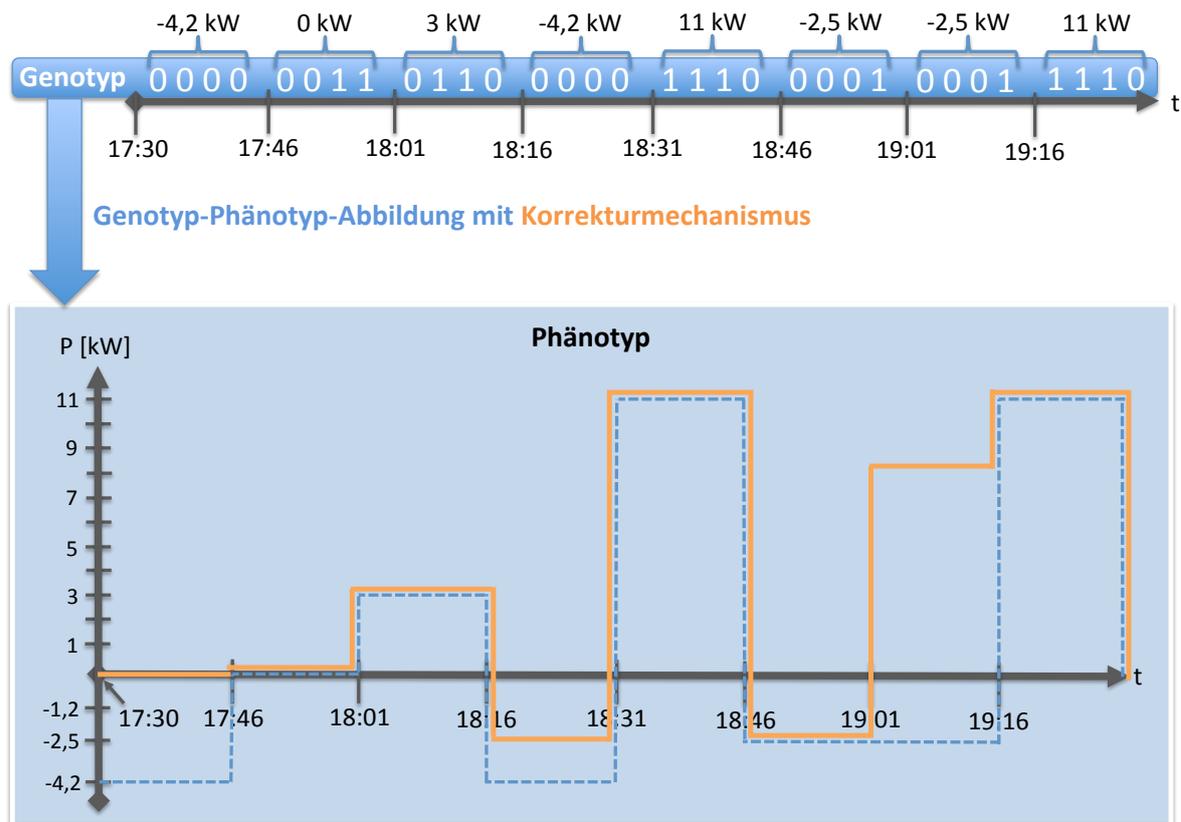


Abbildung 4.5: Korrekturmechanismus bei der Genotyp-Phänotyp-Abbildung im Teilproblem

- 18:01 3 kW  $\hat{=}$  750 Wh  $\rightarrow$  keine Restriktionsverletzung, Restzeit ausreichend zum Vollladen  
 $\Rightarrow$  laden mit 3 kW (Energielevel = 5,717 kWh)
- 18:16 -4,2 kW  $\hat{=}$  -1050 Wh  $\rightarrow$  unterschreitet Mindestreichweite  
 $\Rightarrow$  rückspeisen mit niedrigerer Stufe -2,5 kW  $\hat{=}$  -625 Wh (Energielevel = 5,092 kWh)
- 18:31 11 kW  $\hat{=}$  2750 Wh  $\rightarrow$  keine Restriktionsverletzung, Restzeit ausreichend zum Vollladen  
 $\Rightarrow$  laden mit 11 kW (Energielevel = 7,842 kWh)
- 18:46 -2,5 kW  $\hat{=}$  -625 Wh  $\rightarrow$  keine Restriktionsverletzung, Restzeit ausreichend zum Vollladen  
 $\Rightarrow$  rückspeisen mit -2,5 kW (Energielevel = 7,217 kWh)
- 19:01 -2,5 kW  $\hat{=}$  -625 Wh  $\rightarrow$  Restzeit (ab 19:16) zum Vollladen würde nicht ausreichen  
 $\Rightarrow$  laden mit 8,135 kW  $\hat{=}$  2033 Wh (Energielevel = 9,25 kWh)
- 19:16 11 kW  $\hat{=}$  2750 Wh  $\rightarrow$  benötigte Energiemenge kann vollständig geladen werden  
 $\Rightarrow$  laden mit 11 kW (Energielevel = 12 kWh)
- 19:30 Geplanter Abfahrtszeitpunkt erreicht, Batterie vollständig aufgeladen

In Abbildung 4.5 ist das Ergebnis der Genotyp-Phänotyp-Abbildung an der gestrichelten blauen Lastkurve abzulesen, während die korrigierte Lastkurve, die eine den Restriktionen entsprechend gültige Lösung liefert, als orangefarbene durchgezogene Linie dargestellt ist.

Letzten Endes wird nach der Genotyp-Phänotyp-Abbildung und Durchführung der Korrekturmechanismen das vom evolutionären Algorithmus vorgeschlagene Teilindividuum (welches sich auf das E-Fahrzeug bezieht), also der Genotyp, in seiner Struktur nicht modifiziert und fließt somit unverändert in die nächste Generation an möglichen Lösungen mit ein. Die Selektion des Individuums für die nächste Population hängt allein von seiner Fitness ab, was eine Ähnlichkeit zum sogenannten Baldwin-Lerneffekt darstellt.

Der Wert der Fitness errechnet sich bei einer Stromkosten-basierten Optimierungsfunktion durch die simple Multiplikation der resultierenden Lastkurve mit dem Strompreis und Addition von Strafkosten für die Überschreitung einer optionalen Lastbegrenzungskurve sowie der Addition von Bewertungsfaktoren wie der Verletzung weicher und harter Restriktionen das Elektrofahrzeug betreffend. Eine mathematische Darstellung der entsprechenden Bewertungsfunktion ist [3], Abschnitt 5.2 zu entnehmen.

### 4.3.5 Die Wahl einer geeigneten Bitvektor-Repräsentation

Die in Tabelle 4.2 vorgestellte Abbildung eines 4-Bit Bitvektors auf Leistungswerte ist eine von mehreren Möglichkeiten, die, wie sich zeigt, nach Anwendung der obig beschriebenen Korrekturen sehr unterschiedliche Auswirkungen auf das vom evolutionären Algorithmus als Lösung präsentierte Lastprofil des Elektrofahrzeugs haben. Beispielsweise haben Beobachtungen gezeigt, dass die im Verhältnis zu den positiven Leistungsstufen ohnehin zahlenmäßig unterrepräsentierten Rückspeisestufen mit dieser Abbildung seltener zum Einsatz kommen als mit einer Abbildung, bei der für negative Leistungswerte nicht die beiden höchstwertigsten Bits des 4-Bit Bitvektors auf 0 gesetzt sein müssen. Tabelle 4.3 verdeutlicht bezogen auf die Rückspeisestufen eine solche alternative Abbildung, wobei hier die Stufe -2,5 kW doppelt zum Einsatz kommt.

Tabelle 4.3: Modifizierte Abbildung eines 4-Bit-Strings auf negative Leistungswerte

Bitvektor	Leistung [kW]
1000	-4,2
0100	-2,5
0010	-2,5
0001	-1,2

Eine solche binäre Kodierung und Abbildung des Bitvektors auf reale Leistungswerte bringt jedoch Probleme hinsichtlich der sogenannten Hamming-Klippe mit sich [58]. Eine Hamming-Klippe beschreibt den Effekt, dass benachbarte Phänotypen (mit einer Distanz von 1) durch völlig voneinander verschiedene Genotypen repräsentiert werden, deren Nachbarschaft weit größer als 1 ist. Als erläuterndes Beispiel sollen die Werte aus Tabelle 4.2 dienen: Der Leistungswert (Phänotyp) 4 kW unterscheidet sich vom Leistungswert 5 kW durch eine Distanz von 1 kW. Deren jeweilige genotypische Repräsentation 0111 (für 4 kW) und 1000 (für 5 kW) unterscheiden sich jedoch in allen 4 Bits voneinander, was eine Hamming-Distanz von 4 ergibt. Umgekehrt betrachtet würde das Kippen des niedrigwertigsten Bits des Bitvektors 1110, welcher 11 kW repräsentiert, zum Bitvektor 1111 führen, welcher nach der vorgestellten Abbildung 0 kW entspricht und somit eine Hamming-Klippe mit einer Distanz von 11 in sich birgt.

Dieses Phänomen ist vor allem für solche evolutionäre Verfahren problematisch, welche eine mutationsbasierte Suche nach einer optimalen Lösung verwenden, bei der ein Genotyp durch das Flippen einzelner Bits mutiert wird, da hier eine höhere Gefahr besteht, sich in lokalen Minima zu verfangen [58] [15].

Um das Problem einer Hamming-Klippe zu umgehen, wurde die sogenannte *Gray-Kodierung* entwickelt, bei der die Hamming-Distanz zwischen zwei Genotypen, deren phänotypische Repräsentation sich durch 1 unterscheidet, auch stets 1 beträgt. Eine binäre Kodierung lässt sich durch eine einfache Abbildungsvorschrift auf die Gray-Kodierung abbilden und umgekehrt, die Anzahl der Bits bleibt identisch. Folglich muss für die Abbildung eines 4-Bit-Bitvektors auf entsprechende Leistungswerte eine Abbildungsvorschrift gemäß Tabelle 4.4 zum Einsatz kommen.

Tabelle 4.4: Abbildung eines 4-Bit-Strings auf Leistungswerte mittels Gray-Kodierung

Bitvektor	Leistung [kW]	Bitvektor	Leistung [kW]
0000	0	1100	8
0001	0	1101	9
0011	2	1111	10
0010	3	1110	11
0110	4	1010	-4,2
0111	5	1011	-2,5
0101	6	1001	-1,2
0100	7	1000	0

Auch hier ergibt sich wieder der Fall, dass sich für Rückspeisestufen das Muster „10“ für die beiden höchstwertigsten Bits des 4-Bit-Bitvektors ergeben muss, jedoch wird dies zugunsten der Überwindung der Hamming-Klippe in Kauf genommen. Der Leistungswert 1 kW wird hier aufgrund der technischen Restriktion durch das gegebene Elektrofahrzeug auf 0 kW abgebildet. Man hätte hierfür auch bspw. den Wert 2 kW wählen können.

Experimentelle Untersuchungen haben darüber hinaus die Vermutung bestätigt, dass diese Kodierung immer noch einen weiteren Effekt mit sich bringt: das Verhältnis von Rückspeise zu den restlichen Aktionen (laden oder Ladepause einlegen) entspricht 3 : 16. Dies bedeutet, dass statistisch gesehen in fast jedem vierten Intervall eine Rückspeiseaktion durchgeführt werden soll. Damit in nur zur aktuellen Hauslast passenden Momenten Energie rückgespeist wird (siehe weiche Restriktion „Sinnvolle Rückspeisung“), muss die Rückspeisung entsprechend für den globalen Optimierer mit Strafkosten versehen werden. Treten die Rückspeisevorgänge jedoch verhältnismäßig häufig auf, so müssten die Strafkosten extrem hoch angesetzt werden, um diese eher selten benötigten Vorgänge einzuschränken. Dies würde jedoch wiederum die Wahrscheinlichkeit, dass einmal sinnvoll Energie rückgespeist wird, evtl. verringern.

Um diesem Effekt zu begegnen, könnte man beispielhaft fünf statt vier Bits für die Kodierung der Leistungswerte nutzen, um das Verhältnis auf 3 : 32 zu heben. Die zusätzlichen 16 Werte könnten bspw. alle auf 0 kW (Ladepause) oder einigermaßen gleichverteilt auf die übrigen Ladezustände verteilt werden, wobei bei der Verteilung stets die Hamming-Klippe zu beachten ist. So würde eine Abbildung eines 5-Bit-Bitvektors auf entsprechende Leistungswerte

bspw. gemäß Tabelle 4.5 aussehen. Durch die Abbildung aller zusätzlichen 16 Werte auf den Leistungswert 0 kW würde das E-Fahrzeug nicht zu übermäßig vielen Ladevorgängen animiert und darüber hinaus auch einer Oszillation entgegengewirkt.

Zieht man jedoch in Erwägung, wie in Abschnitt 4.3.1, Seite 60 beschrieben, das zur Verfügung stehende Optimierungszeitfenster in mehrere kleinere Fenster zu unterteilen, um den Bitvektor klein zu halten, so könnte sich eine solche 5-Bit-Kodierung aufgrund eines Ladepausenanteils von über 50 % wieder negativ auswirken. Eine Evaluation dieses Aspekts ist entsprechend Abschnitt 6.2 zu entnehmen.

Ein weiterer Nebeneffekt dieser Kodierung ist selbstverständlich die Vergrößerung des Suchraums durch das zusätzliche Bit pro Zeitintervall.

Tabelle 4.5: Abbildung eines 5-Bit-Bitvektors auf Leistungswerte mittels Gray-Kodierung

Bitvektor	P [kW]						
00000	0	01100	8	11000	0	10100	0
00001	0	01101	9	11001	0	10101	0
00011	2	01111	10	11011	0	10111	0
00010	3	01110	11	11010	0	10110	0
00110	4	01010	-4,2	11110	0	10010	0
00111	5	01011	-2,5	11111	0	10011	0
00101	6	01001	-1,2	11101	0	10001	0
00100	7	01000	0	11100	0	10000	0

### 4.3.6 Berücksichtigung der Ladecharakteristik einer Lithium-Ionen-Batterie

Für die flexible Einplanung des Elektrofahrzeugs als Energiespeicher wie auch Verbraucher wurde in den bisherigen Abschnitten davon ausgegangen, dass die Batterie exakt gemäß dem vom Gesamtenergiemanagement überlieferten Lastprofil geladen werden kann. Kurz vor dem Abfahrtszeitpunkt sollte die Batterie unter Berücksichtigung der vorgestellten Restriktionen bereits fast vollständig geladen sein. Bei einem hohen Ladezustand (bspw. > 90%) kann ein Ladevorgang jedoch nicht mit der maximal verfügbaren Leistung von 11 kW durchgeführt werden (wie in Abbildung 4.5 dargestellt). Dieses Modell muss daher bzgl. der spezifischen Ladecharakteristik einer Lithium-Ionen-Batterie präzisiert werden, wonach sich deren Ladeprozess in zwei Phasen einteilen lässt: eine Konstantstromphase (Constant Current – CC) und eine Konstantspannungsphase (Constant Voltage – CV). Man spricht hierbei auch vom CC-CV-Ladeverfahren.

Das Ladegerät ist die Komponente im Elektrofahrzeug, welche den Ladestrom regelt und wiederum vom Batteriemanagementsystem in Abhängigkeit von Messdaten der Zell- und Modulspannungen gesteuert wird. Abbildung 4.6 gibt einen Überblick über die Komponenten Ladegerät, Batterie und Batteriemanagementsystem und illustriert deren Interaktion. Die Auswirkung des CC-CV-Ladeverfahrens auf den Stromfluss sowie den Zellspannungsverlauf in der Batterie wird anhand der Abbildung 4.7 deutlich, welche einen ungesteuerten Ladevorgang darstellt.

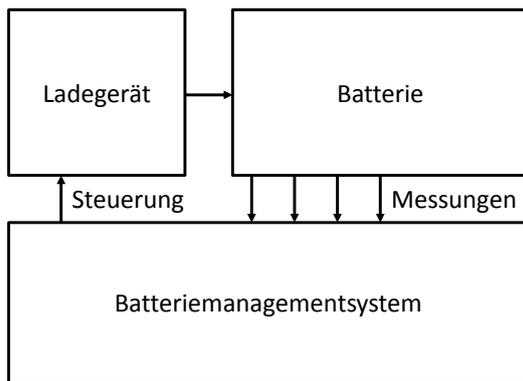


Abbildung 4.6: Zusammenhang der Komponenten Ladegerät, Batterie und Batteriemanagementsystem [63]

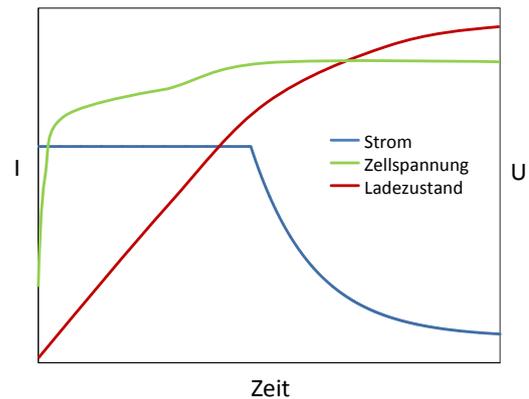


Abbildung 4.7: Strom- und Zellspannungsverlauf beim CC-CV-Ladeverfahren [63]

### Die Konstantstromphase

In der Konstantstromphase wird mit einem konstant vorgegebenen Ladestrom  $I$  so lange geladen, bis ein vom Batteriehersteller vordefinierter Spannungsschwellenwert erreicht ist. Charakteristisch für jede Art von Batterie ist, dass deren interne Zellspannung über die Zeit mit dem Ladestrom steigt. Der Ladeprozess lässt sich lediglich in der Konstantstromphase beliebig vom EMS steuern.

### Die Konstantspannungsphase

Ist der Spannungsschwellenwert (auch Ladeschlussspannung genannt) erreicht, so wird die Zellspannung auf konstantem Niveau gehalten, indem der Ladestrom sukzessive reduziert wird. Wie Abbildung 4.7 zu entnehmen ist, geschieht diese Reduktion in exponentiellem Maße. Der Ladevorgang wird beendet, sobald eine ebenfalls vom Batteriehersteller festgelegte minimale Stromstärke unterschritten wird. Die Dauer der CV-Phase nimmt etwa so viel Zeit in Anspruch, wie das Laden in der CC-Phase. Die Konstantspannungsphase dient dazu, die einzelnen Batteriezellen gänzlich zu füllen, ohne Gefahr zu laufen, diese durch einen zu hohen Ladestrom zu überladen. Eine Analogie zum Wasserhahn ist hier dienlich: hier dreht man am Ende den Wasserhahn weiter zu, will man ein Glas komplett mit Wasser füllen, ohne es jedoch zum Überlaufen zu bringen.

Der Zeitpunkt des Übergangs von der CC- zur CV-Phase hängt von drei Einflussfaktoren ab:

1. Ladezustand zu Beginn des Ladevorgangs (Start-SOC)
2. Ladestromstärke während der CC-Phase
3. Batterietemperatur

Abbildung 4.8 vergleicht den Beginn der CV-Phase dreier Ladevorgänge des in Abschnitt 3.1 beschriebenen Elektrofahrzeugs in Abhängigkeit verschiedener Batterietemperaturen bei ähnlicher Leistung in der CC-Phase und gleichem initialen Ladezustand von 59%. Hier ist deutlich zu erkennen, dass mit geringerer Batterietemperatur sich der Beginn der CV-Phase

nach vorne verlegt und somit die Dauer der flexiblen Ladesteuerung verkürzt. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass in den kalten Wintertagen die Flexibilität der Ladesteuerung im Vergleich zu warmen Sommertagen abnimmt.

Abbildung 4.9 veranschaulicht den Einfluss unterschiedlicher Ladeleistungen auf den Übergangzeitpunkt von der CC- zur CV-Phase und macht deutlich, dass mit einer höheren Ladeleistung die Ladeschlussspannung auch früher erreicht wird.

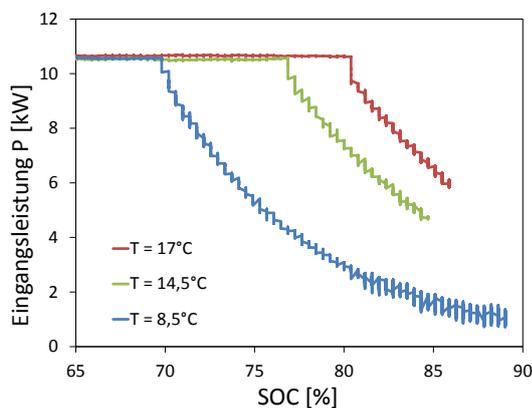


Abbildung 4.8: Verlauf dreier Ladevorgänge mit ähnlicher Leistung in der CC-Phase und Start-SOC 59 % [63]

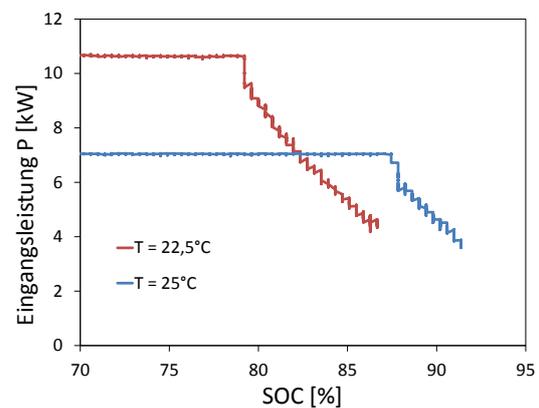


Abbildung 4.9: Verlauf zweier Ladevorgänge mit ähnlicher Temperatur und Start-SOC 50 % [63]

Die Analyse der fahrzeuginternen Kenndaten des im Versuchsaufbau eingesetzten Elektrofahrzeugs führt zu dem Schluss, dass der Übergang von der CC- zur CV-Phase zwischen den beiden SOC-Werten 68 % und 90 % schwankt und einen Mittelwert von ca. 83 % aufweist. Angenommen, dass vom globalen Controller überlieferte Lastprofil für das Elektroauto würde vorsehen, dass die Batterie für die Dauer der Konstantspannungsphase mit maximaler Leistung lädt, bspw. weil die PV-Anlage des Smart Home sehr viel Strom erzeugt und der Strompreis aufgrund geringer Last im Netz sehr gering ist, dann würde eine recht hohe Prognoseunsicherheit bzgl. der tatsächlich vom Fahrzeug induzierten Last entstehen.

Grob gesprochen würde dann etwas mehr als die Hälfte der als Last eingeplanten Energiemenge nicht abgerufen werden, wie anhand Abbildung 4.7 abgelesen werden kann. Gleiches wird mit einem spezifischen Beispiel in Abbildung 4.10 dargestellt. Dies würde im schlechtesten Falle also dazu führen, dass die Hälfte der Energie, die in der CV-Phase benötigt würde, zum Abfahrtszeitpunkt nicht geladen wäre.

Laut der ISO/IEC 15118-2 Spezifikation reagiert das Elektrofahrzeug mittels der Power-DeliveryReq Nachricht auf ein von der Ladestation vorgeschlagenes Lastprofil entweder mit einer Bestätigung desselben Profils oder mit einer Modifikation nach Korrektur durch das BMS. Somit ließe sich anhand der Abweichung vom vorgeschlagenen Profil der Beginn der Konstantspannungsphase ablesen. Dies setzt jedoch eine implementierte Schnittstelle zum BMS voraus, welche im vorliegenden Versuchsaufbau nicht zur Verfügung stand. Daher wird das Delta der Energiemenge, welche in der CV-Phase nicht mit 11 kW geladen werden kann, approximiert und entsprechend dem Teilproblem übermittelt, damit dieses Verhalten geeignet berücksichtigt werden kann.

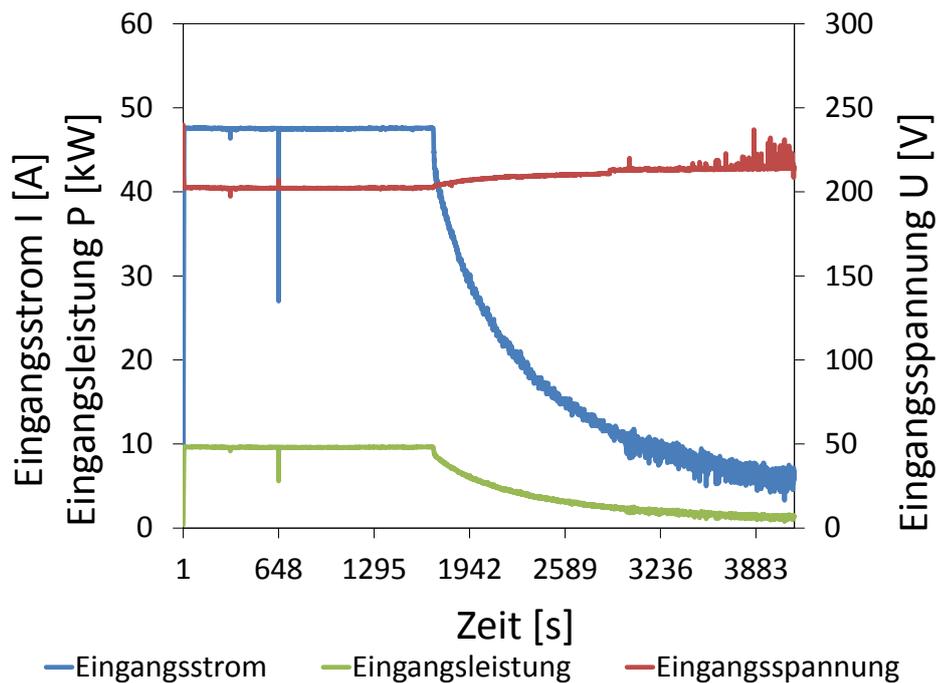


Abbildung 4.10: Beispielhafter Verlauf von Eingangsstrom, -Spannung und -Leistung während eines ungesteuerten dreiphasigen Ladevorgangs mit durchschnittlich 10 kW [63]

## 4.4 Der lokale Controller

Aufgabe eines lokalen Controllers ist es allgemein, die vom Gesamtenergiemanagement durch den globalen Controller übermittelten Anweisungen in für die entsprechende Haushaltskomponente verständliche Befehle und Informationen zu übersetzen und diese Übersetzung durch die Hardware-Abstraktions-Schicht an den Treiber zu senden. Im Falle des Elektrofahrzeugs kann die Anweisung entweder ein statisches oder ein dynamisches Lastprofil repräsentieren. Das statische Lastprofil leitet das Elektrofahrzeug dazu an, einen sofortigen Ladevorgang mit maximal verfügbarer Leistung zu starten, um schnellstmöglich die benutzerdefinierte Mindestreichweite zurücklegen zu können. Das dynamische Lastprofil entspricht dem Phänotyp, welcher nach Anwendung der beschriebenen Korrekturmechanismen als gültiges Lastprofil für eine flexible Einplanung des E-Fahrzeugs übermittelt wurde. Der lokale Controller muss das über das Registrar kommunizierte Datenobjekt nun daraufhin überprüfen und ein einheitliches Lastprofil-Datenobjekt (`ECarControllerExchange`) an den ISO/IEC 15118-Treiber senden.

## 4.5 Der ISO/IEC 15118-2 Treiber

Der Treiber hat u. a. die Aufgabe, sowohl die initialen Ladeparameter, welche über die `ChargeParameterDiscoveryReq` Nachricht eintreffen, als auch die mittels der `ChargingStatusReq` Nachricht gesendeten Aktualisierungen (vgl. Abschnitt 4.2, Seite 57) an den lokalen Observer im gekapselten Datenobjekt `CarDetails` zu übermitteln. Darüber hinaus muss dem Observer mitgeteilt werden, sobald das E-Fahrzeug nicht mehr mit der Ladestation verbunden ist und somit auch nicht mehr zur Einplanung für das Energiemanagement bereit steht.

Es kann der Fall eintreten, dass das E-Fahrzeug zwar physisch mit der Ladestation verbunden ist, aber keine aktive Ladesession vorliegt, aufgrund der Lastsituation im Smart Home jedoch sofort mit dem Laden oder Rückspeisen von Energie begonnen werden sollte. Eine Ladesession kann durch einen Fehler in der Ladekommunikation (z. B. Störung der Ethernet-Verbindung oder der Kommunikation mit dem Ladesteuergerät) oder schlichtweg durch eine geplante Ladepause beendet werden. In beiden Fällen muss der Treiber dafür sorgen, dass das E-Fahrzeug eine erneute Ladesession aufbaut, im Rahmen derer das gewünschte Ladeprofil mitgeteilt werden kann. Dies kann bspw. dadurch geschehen, dass das PWM-Modul kurzfristig ein anderes Signal als 5 % (siehe Abschnitt 2.1.2) anlegt, was den Ladecontroller dazu veranlasst, wieder aufzuwachen und eine neue Ladesession zu starten.

In entgegengesetzter Richtung hat der Treiber die Aufgabe, das vom lokalen Controller empfangene Lastprofil in einen passenden Datentyp gemäß der ISO/IEC 15118-2 Spezifikation zu übersetzen.

Der vom lokalen Controller übermittelte Datentyp `ECarControllerExchange` beinhaltet den Datentyp `ECarChargeSchedule`, welcher wiederum aus einer Liste von `ECarChargeScheduleEntry`-Tupeln besteht. Diese Tupel setzen sich gemäß der formalen Darstellung aus Abschnitt 4.3.3 aus dem Start eines Intervalls  $t_i$  sowie der Leistung  $p_{EV,i}$ , mit welcher in diesem Intervall geladen oder rückgespeist werden soll, zusammen.

Der ISO/IEC 15118-2 Parameter `PMaxSchedule` (siehe Param 12 aus Tabelle 4.1) ist ein gutes Beispiel dafür, wie verschachtelt und komplex aufgebaut die Datentypen dieser Norm sich oftmals präsentieren. Eine Aufschlüsselung des Parameters ist Tabelle 4.6 zu entnehmen.

Tabelle 4.6: Verschachtelung des Datentypen `PMaxSchedule`

Parameter/Typ	vom Typ	enthält
<code>PMaxSchedule</code>	<code>PMaxScheduleType</code>	
<code>PMaxScheduleType</code>		<code>RelativeTimeInterval</code> <code>PMax</code>
<code>RelativeTimeInterval</code>	<code>TimeInterval</code> (abstrakt)	<code>start</code> <code>duration</code>
<code>PMax</code>	<code>PhysicalValueType</code>	
<code>PhysicalValueType</code>		<code>Multiplier</code> <code>Unit</code> <code>Value</code>
<code>start</code>	Integer	
<code>duration</code>	Integer	
<code>Multiplier</code>	Byte	
<code>Unit</code>	Enumeration (z. B. V, A, Wh)	
<code>Value</code>	Short	

Der Parameter `duration` ist ein optionaler, da dieser nur für das letzte Zeitintervall genutzt wird, um die Dauer des letzten Lade-/Rückspeisevorgangs zu bemessen. Die Zeitwerte werden jeweils als Offset in Sekunden vom Versenden der Nachricht angegeben.

Um den Speicherplatz für die nötigen Wertebereiche aller zu übermittelnden physikalischen Werte zu begrenzen, wurde für den Parameter `Value` der Typ `Short` gewählt. Für über den Wertebereich von `Short` hinausgehende Werte wird der Parameter `Multiplier` genutzt, welcher als Exponent zur Basis 10 zu verstehen ist. Der eigentliche physikalische Wert wird folgendermaßen berechnet.

$$\text{Physikalischer Wert} = \text{Value} \times 10^{\text{Multiplier}} [\text{Unit}]$$

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass der Treiber lediglich eine Lastbegrenzungskurve und kein weiteres optionales Strompreissignal (siehe Parameter `SalesTariff` aus Abschnitt 2.2.1, Seite 36) über das ISO/IEC 15118 Protokoll an das Elektrofahrzeug sendet. Die Lastbegrenzungskurve dient als *direktes Steuersignal*, denn das Fahrzeug wird die Leistungsobergrenze in jedem Zeitintervall voll ausnutzen, sofern aus Sicht des Batteriemangements, welches die Aufgabe hat, den sicheren Betrieb der Batterie zu gewährleisten, nichts dagegen spricht. Das Batteriemangement würde bspw. das Ladegerät dazu anleiten, den Ladestrom zu reduzieren, wenn die Batterie selbst einen kritischen Temperaturbereich überschritten hat oder der Ladeprozess der Batterie sich in der Konstantspannungsphase befindet und aufgrund der Ladecharakteristik einer Lithium-Ionen-Batterie (siehe Abschnitt 4.3.6) ein ladestationsseitig angeforderter Ladestrom in dieser Zeitspanne nicht zulässig ist.

Der tarifliche Anreiz durch ein vom Energieanbieter kommuniziertes Strompreissignal ist durch den Optimierungsvorgang des Gesamtenergiemanagements bereits im Parameter `PmaxSchedule` enthalten.

## 4.6 Datenobjekte im Kommunikationsfluss zwischen Elektroauto und EMS

Nachdem in den vorigen Abschnitten dieses Kapitels die diversen Komponenten, welche für die softwaretechnische Integration des Elektrofahrzeugs in das EMS des Smart Home unabdingbar sind, erläutert wurden, soll an dieser Stelle noch einmal ein zusammenhängender Überblick gegeben werden. Zu diesem Zweck ist in den Abbildungen 4.11 und 4.12 ein beispielhafter Kommunikationsfluss zwischen den Komponenten EVCC, SECC, Treiber, lokaler Observer und Controller sowie dem EMP visualisiert.

Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 beschrieben und Abbildung 2.10 illustriert, beginnt eine Kommunikationssession über ISO/IEC 15118 zwischen dem Client (EVCC) und dem Server (SECC) mit dem Aufbau der IP-basierten Kommunikation. Da aber erst mit dem Empfang der `ChargeParameterDiscoveryReq` Nachricht eine Interaktion mit dem EMS ausgelöst wird, beginnt das Sequenzdiagramm in Abbildung 4.11 mit ebendieser Nachricht.

Die `ChargeParameterDiscoveryReq` Nachricht enthält u. a. den Parameter `ACEVChargeParameter`, welcher die Ladeparameter (`ChargeParameter`) im Falle des Wechselstromladens (AC) eines Elektrofahrzeugs (EV) übermittelt. Der SECC ruft nun die Methode `processChargeParameterDiscoveryReq(ACEVChargeParameter)` des Treibers auf und sendet somit diesen Parameter an den Treiber weiter.

Der Treiber kapselt sodann diese Ladeparameter in den Datentyp `CarDetails`, welcher die in Abschnitt 4.2, Seite 57 gelisteten Daten enthält, ergänzt um die Zustandsinformationen

- Verbindungsstatus (`connected`) und
- aktive Kommunikationssession (`v2gCommSessionActive`).

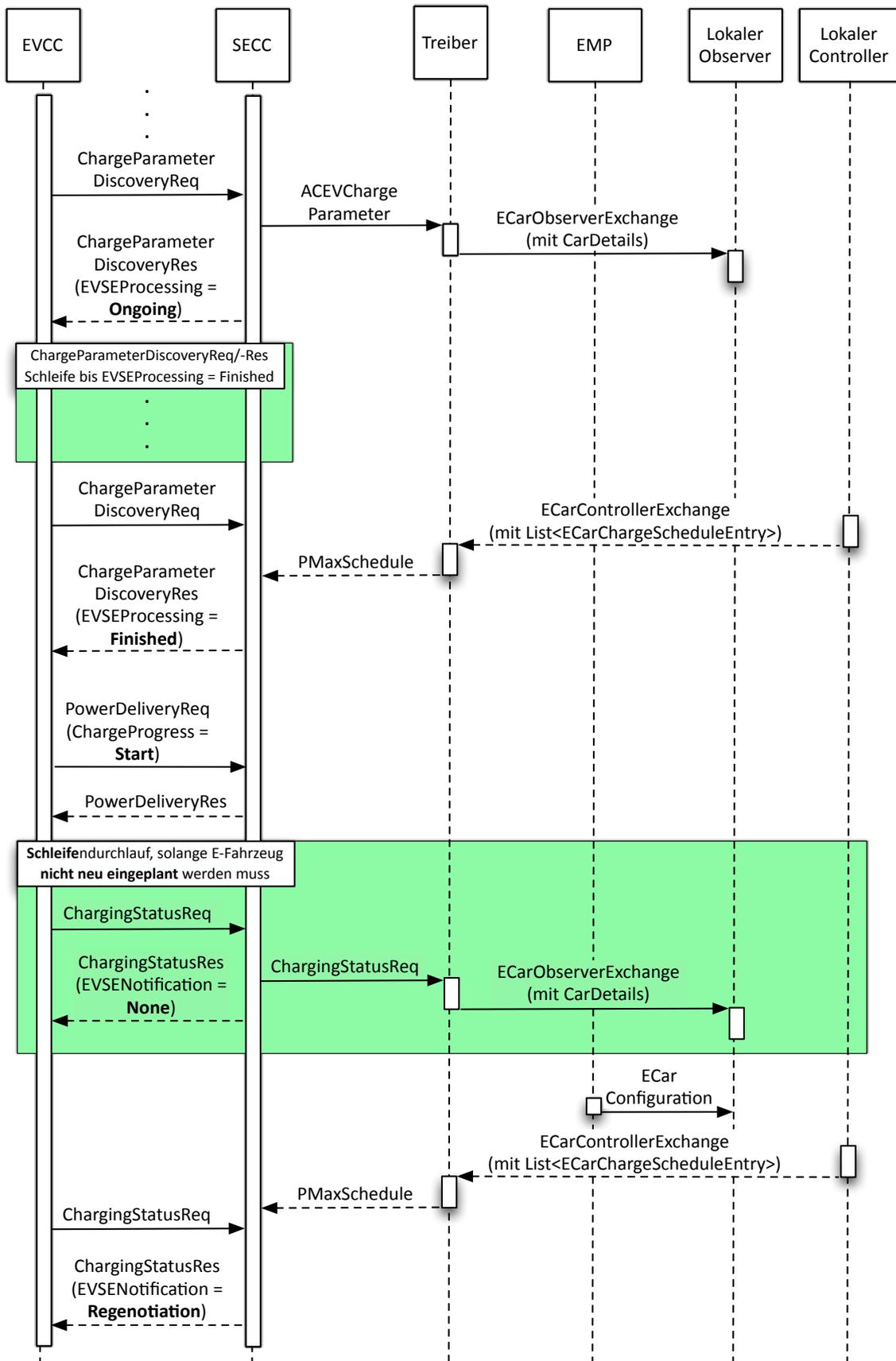


Abbildung 4.11: Beispielhafter Kommunikationsfluss zwischen den Entitäten EVCC, SECC, Treiber, EMP sowie lokalem Observer und Controller (Teil 1/2)

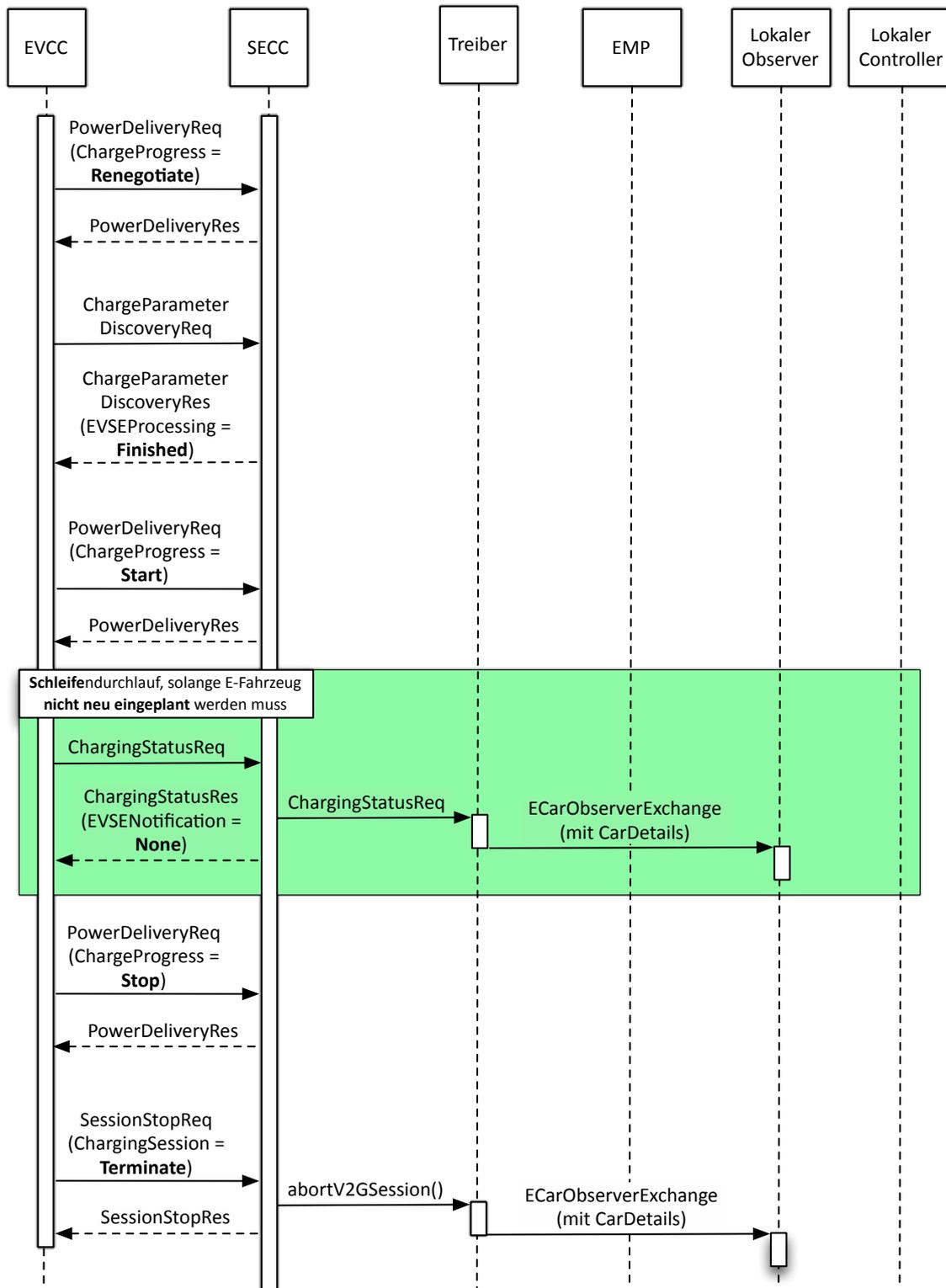


Abbildung 4.12: Beispielhafter Kommunikationsfluss zwischen den Entitäten EVCC, SECC, Treiber, EMP sowie lokalem Observer und Controller (Teil 2/2)

Diese beiden Informationen lassen eine Unterscheidung zwischen einem mit der Ladestation physikalisch nicht verbundenen Elektrofahrzeug und einer lediglich inaktiven Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation zu. Dieser Unterschied ist bspw. wichtig, um zu differenzieren, ob neben dem aktuellen Batteriestatus ebenso die aus dem Fahrzeug stammende Abfahrtszeit sowie minimale Reichweite an das EMP zur Aktualisierung gesendet werden soll (siehe Diskussion aus Abschnitt 4.2, Seite 59). Im Falle der Verarbeitung der initialen Ladeparameter werden beide Werte auf `true` gesetzt. Über die Methode `notifyLocalObserver()` des Treibers werden diese `CarDetails` im abstrahierten Datenobjekt `ECarObserverExchange` an den lokalen Observer gesendet.

Der lokale Observer verarbeitet die Ladeparameter und erstellt ein Teilproblem (ein `ECarEAPart`) für den evolutionären Algorithmus des Gesamtoptimierers, welches dann wiederum an den globalen Observer mit `notifyGlobalObserver()` gesendet wird. Bei der Verarbeitung von `CarDetails` wird nun zwischen mehreren Fällen unterschieden, welche in Abbildung 4.13 dargestellt werden. Die resultierenden Benachrichtigungen an den globalen Observer sind folgendermaßen zu differenzieren:

- (1) Kommunikationssession ist aktiv, Beginn einer Ladesession  
⇒ Erstellung eines dynamischen, *neu einzuplanenden* Teilproblems (`ECarEAPart`), wobei erst nach der Zeitspanne, die zum Laden der Energie für die Gewährleistung der Mindestreichweite nötig ist, das flexible Scheduling beginnen kann.
- (2) Kommunikationssession ist aktiv, Ladeschleife ist aktiv und eine Veränderung des SOC wurde festgestellt  
⇒ Erstellung eines dynamischen, *nicht neu einzuplanenden* Teilproblems, welches das alte Teilproblem ersetzt und lediglich die Informationen bzgl. Energiemengen und Ladestatus aktualisiert.
- (3) Kommunikationssession ist inaktiv, E-Fahrzeug ist nicht mehr physikalisch verbunden  
⇒ Erstellung eines *statischen, neu einzuplanenden* Teilproblems, welches das alte Teilproblem ersetzt und ein Lastprofil mit einem Eintrag besitzt:  
(Start = jetzt, Leistung = 0 kW).

Aufgrund der in der ISO/IEC 15118-2 definierten Timeouts muss einerseits spätestens alle 60 s eine Request-Nachricht vom EVCC an den SECC gesendet werden und andererseits im Falle der `ChargeParameterDiscoveryReq` Nachricht spätestens nach 2 s eine Response-Nachricht vom SECC an den EVCC zurückgesendet werden. Die `ChargeParameterDiscoveryRes` enthält den vom EMS vorgeschlagenen Ladefahrplan `PMaxSchedule`. Da nun aber eine Rechenzeit von kleiner 2 s für die Berechnung einer geeigneten Lastkurve für das Elektrofahrzeug (unter Berücksichtigung der Gesamtlastsituation im Smart Home) oftmals nicht ausreicht, gibt es in der Response-Nachricht den nützlichen Parameter `EVSEProcessing`. Dieser klärt den EVCC darüber auf, ob der SECC bereits eine Lastkurve bereitstellen konnte (`Finished`) oder noch Zeit benötigt (`Ongoing`). Dieser Mechanismus wurde in der Spezifikation eingefügt, um einer verzögerten Kommunikation zwischen einer Ladestation und dem Backend des E-Mobilitäts-Anbieters Rechnung tragen zu können. Ist der Parameter auf `Ongoing` gesetzt, so veranlasst dies eine Schleife, in der der EVCC so lange eine `ChargeParameterDiscoveryReq` Nachricht sendet, bis `EVSEProcessing = Finished` in der Antwortnachricht gesetzt wurde.

Wurde nun vom globalen Controller eine Lastkurve für das E-Fahrzeug an den lokalen Controller übermittelt, so sendet dieser das abstrahierte Lastprofil mittels des `ECarControllerExchange`-Datenobjekts an den Treiber, welcher wiederum die Übersetzung in den

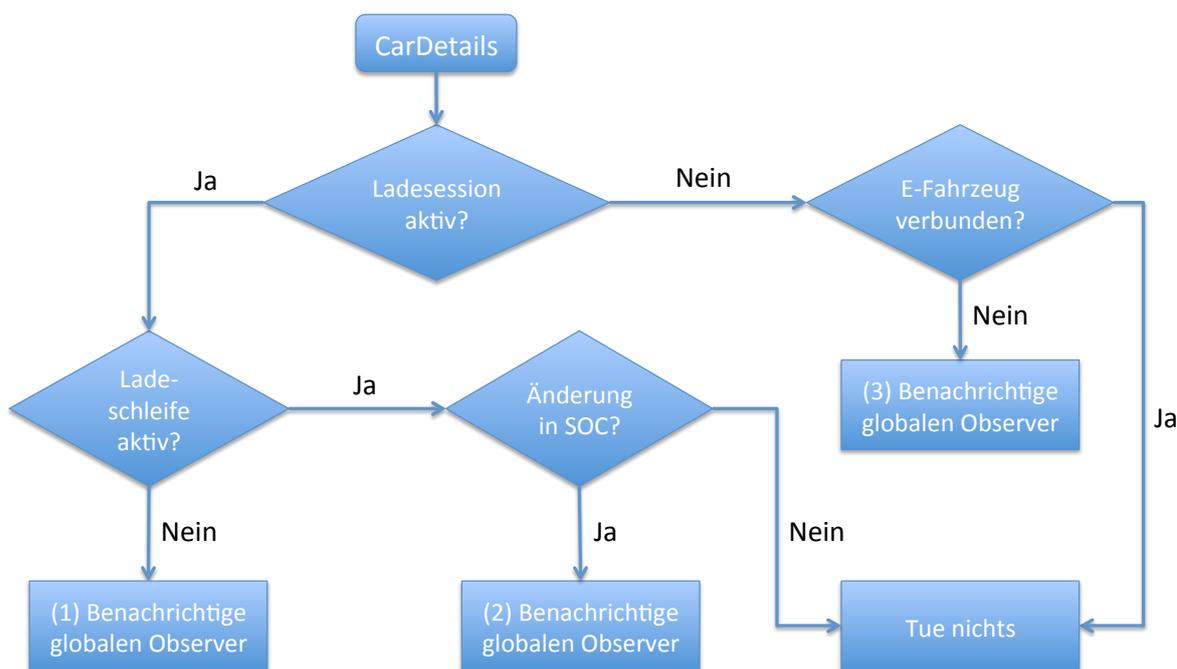


Abbildung 4.13: Fallunterscheidung im lokalen Observer beim Verarbeiten von vom Treiber gesendeten CarDetails

ISO/IEC 15118-2-typischen PMaxSchedule vornimmt und diesen Datentyp dem SECC zur Verfügung stellt.

Da nun ein Ladefahrplan dem EVCC übermittelt werden konnte, erfolgt als nächstes eine PowerDeliveryReq Nachricht, welche mittels des Parameters ChargeProgress den SECC darüber informiert, dass sofort mit dem Ladeprozess begonnen (Start), eine Neuverhandlung bestätigt (Renegotiate) oder die Ladesession beendet bzw. pausiert (Stop) werden soll. Eine Ladepause würde bspw. dann stattfinden, wenn die erste Lade- oder Rückspeiseanforderung verzögert erfolgen wird und der Ladesteuerungscomputer sich bis dahin schlafen legt, um Energie zu sparen. Des Weiteren beinhaltet diese Request-Nachricht auch den vom Fahrzeug akzeptierten Ladefahrplan, der prinzipiell vom vorgeschlagenen Ladefahrplan abweichen kann, im vorliegenden Versuchsaufbau aber stets akzeptiert wird und daher keine erneute Benachrichtigung des Treibers nach sich zieht.

Nun beginnt die eigentliche Abarbeitung des Ladefahrplans, im Zuge dessen Energie entweder geladen oder rückgespeist wird. Das im Treiber bereits existierende CarDetails-Objekt wird durch die Werte der in ChargingStatusReq enthaltenen Parameter eAmount, eAmountDischarge und soc aktualisiert und erneut an den lokalen Observer geschickt. Um den Datenverkehr im EMS nicht unnötig zu erhöhen, wird gemäß Abbildung 4.13 und bereits beschriebener Prozedur nur nach einer Erhöhung des SOC-Wertes eine neue Benachrichtigung an den globalen Observer gesendet, um somit einerseits den globalen Optimierer über die Energieflüsse im Fahrzeug auf dem Laufenden zu halten und andererseits die Visualisierung der aktuellen Reichweite über das EMP mit den neueren Daten stets aktuell zu halten.

Zwischenzeitlich könnte der Bewohner des Smart Home über das Touch-Display die Einstellungen bzgl. Mindestreichweite oder Abfahrtszeitpunkt im EMP verändert haben, was sich wiederum auf den Ladefahrplan auswirken könnte und entsprechend neu eingeplant werden

muss. Da sich der lokale Observer für Nachrichten-Events vom EMP hat registrieren lassen (siehe Abschnitt 4.2, Seite 59), empfängt er ein `ECarConfiguration`-Objekt über das Registrar und erstellt ein neu einzuplanendes, dynamisches Teilproblem mit den aktualisierten Daten des EMP, welches erneut an den globalen Observer übermittelt wird. Sobald der lokale Controller das aktualisierte Lastprofil für das Elektrofahrzeug vom globalen Optimierer erhalten hat, wird in gleicher Weise wie zuvor über den Treiber ein neues `PMaxSchedule` dem SECC zur Verfügung gestellt.

Damit während des Ladevorgangs eines Elektrofahrzeugs auf kurzfristige Engpasssituationen oder generell Änderungen im Stromnetz reagiert werden kann, enthält u. a. die `Charging-StatusRes` Nachricht den Parameter `EVSEStatus` (siehe Abschnitt 2.2.1, Seite 38), welcher wiederum den Parameter `EVSENotification` enthält und mitteilen kann, ob eine Neuverhandlung des Ladefahrplans vonnöten ist (`Renegotiation`) oder nicht (`None`). Der Ladevorgang wird im Falle einer Neuverhandlung durch ein erneutes `PowerDeliveryReq/-Res` Nachrichtenpaar beendet, wobei diesmal mit dem Parameter `ChargeProgress = Renegotiate` die Neuaushandlung bestätigt wird. Dieser Parameter bewirkt im Übrigen, dass die Ladeschütze der Ladestation nicht wieder geöffnet werden und somit weiterhin Spannung anliegt, nur eben kein Strom fließt, bis ein erneutes `PowerDeliveryReq/-Res` Nachrichtenpaar gesendet wird, diesmal mit `ChargeProgress = Start`. Das zwischenzeitlich ausgetauschte `Charge-ParameterDiscoveryReq/-Res` Nachrichtenpaar hat keinerlei Auswirkung auf den lokalen Observer, da ein erneutes Lastprofil (`PMaxSchedule`) ja bereits vorliegt und der SECC dieses gleich an den EVCC weiter kommuniziert. Es folgt ein weiterer Ladeprozess mit der bereits bekannten Ladeschleife.

Soll nun aus Sicht des EVCC der Ladevorgang beendet werden, so wird ein erneutes `PowerDeliveryReq/-Res` Nachrichtenpaar ausgetauscht, um dediziert über den `Stop` des Ladeprozesses zu informieren. Abschließend erfolgt der Austausch des `SessionStopReq/-Res` Nachrichtenpaares, wobei die Request-Nachricht über den Parameter `ChargingSession` den SECC darüber informiert, ob eine Ladesession nur pausiert (`Pause`) oder gänzlich beendet werden soll (`Terminate`). Ersteres würde die Ladestation dazu veranlassen, gewisse Zustandsinformationen für die nächste Ladesession zu speichern.

Dieser beispielhafte Kommunikationsfluss ist repräsentativ für die Interaktion zwischen den diversen Entitäten und bietet somit ein realistisches Bild.

Eine Situation, die in den Abbildungen 4.11 und 4.12 nicht dargestellt wurde, ist diejenige, in der das Ladesteuergerät (also der EVCC) sich aufgrund einer Ladepause oder nach vollständiger Abarbeitung eines Ladefahrplans aus Energiespargründen schlafen gelegt hat, aber aufgrund einer neuen Lastsituation im Haus das Fahrzeug außerplanmäßig erneut interagieren muss. In diesem Fall liegt es in der Verantwortung des Treibers, nach Benachrichtigung durch den lokalen Controller den EVCC zu reanimieren, woraufhin eine neue Ladesession angestoßen werden würde.

Bevor nun in Kapitel 6 eine Evaluation des hier vorgestellten Ansatzes zur Integration des Elektrofahrzeugs in das Smart Home EMS durchgeführt wird, soll in Kapitel 5 auf das Thema E-Roaming eingegangen werden. Dieses Kapitel lenkt den Fokus weg vom Smart Home und hin zu einem makroskopischeren Gesichtspunkt der E-Mobilität.

In den vorigen Kapiteln wurde eine Form der intelligenten Einbindung eines rückspeisefähigen Elektrofahrzeugs in das Energiemanagement eines Smart Home beschrieben, wobei die Batterie des Fahrzeugs als flexibler Energiespeicher und Verbraucher genutzt wird. Dieses Smart Home Szenario sollte u. a. die Potentiale der ISO/IEC 15118 hinsichtlich eines flexibel steuerbaren Ladevorgangs zum Zwecke der optimierten Eigenstromnutzung und Senkung der Stromkosten aufzeigen und einen Einblick in die relevanten Nachrichten, Parameter und Mechanismen gewähren. Ein weiterer, für den Elektromobilitätsmarkt sehr wichtiger Aspekt, welcher ebenfalls in der Norm beschrieben wird, ist das sogenannte E-Roaming.

Als E-Roaming im Kontext der Elektromobilität wird landläufig die Möglichkeit bzw. das Ziel verstanden, sein Elektrofahrzeug an einer beliebigen Ladestation aufladen zu können, unabhängig davon, ob ein Vertragsverhältnis mit dem Betreiber genau dieser Ladeinfrastruktur besteht. Das heißt der Zugang zu einer Ladestation muss anbieterunabhängig und grenzüberschreitend möglich sein, was neben rein batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen auch für Plug-in Hybride zunehmend relevant ist. Dieses E-Roaming-Prinzip wird vom Ansatz her gerne mit dem altbekannten Mobilfunkroaming verglichen. Das deutsche Joint Venture Hubject, auf welches u. a. im Abschnitt 5.2 noch eingegangen wird, definiert E-Roaming folgendermaßen [36]:

„eRoaming ist ein Marktmodell der Elektromobilität, welches die vertragsbasierte Nutzung von Ladeinfrastruktur als Service für Fahrer von Elektrofahrzeugen in ganz Europa ermöglicht und sich durch eine hohe Transaktionskosteneffizienz sowie Marktoffenheit auszeichnet.“

Hubject ist eine B2B Dienstplattform und verspricht eine einfach zu handhabende Business- und IT-Plattform für die automatisierte Abwicklung vertragsbasierter Geschäftsbeziehungen zwischen Energielieferanten, E-Fahrzeugherstellern, Ladeinfrastrukturanbietern und weiteren E-Mobilitäts-Geschäftspartnern. Der Endverbraucher erhält auf Basis nur eines Kundenvertrages Zugang zu diesem Netzwerk. Das Ziel der Gründungsmitglieder BMW Group, Bosch, Daimler, EnBW, Siemens und RWE ist die Realisierung eines einfachen und anbieterübergreifenden Zugangs zu öffentlicher und semi-öffentlicher Ladeinfrastruktur, wobei die regionalen und nationalen (europäischen) E-Mobilitäts-Märkte vernetzt werden sollen.

Es wurde im Rahmen dieser Arbeit bereits mehrfach angedeutet, dass das sogenannte Plug-and-Charge Identifizierungsverfahren es ermöglicht, alle Aspekte der Authentifizierung, Autorisierung, Abrechnung und Ladesteuerung in einem automatisierten Prozess im Hintergrund und ohne Nutzerinteraktion zu erledigen. Dieser Automatismus basiert auf einem vorher

abgeschlossenen Vertragsverhältnis zwischen E-Fahrzeugnutzer und E-Mobilitätsanbieter. Der Elektromobilist muss hierzu lediglich das Ladekabel mit E-Fahrzeug und Ladestation verbinden und sich um nichts weiter kümmern. Dieses Verfahren gewinnt umso mehr an Bedeutung, je mehr induktive Ladestationen zukünftig zum Einsatz kommen werden, denn hier wünscht sich der Nutzer im Idealfall keinerlei weitere Interaktion, als das Fahrzeug über der meist im Boden eingelassenen Ladespule zu parken. Die Teile ISO/IEC 15118-6 bis -8 spezifizieren für diesen Anwendungsfall nicht nur die induktive Energieübertragung, sondern auch die drahtlose Kommunikation der Ladeparameter.

Ziel dieses Kapitels ist es nun, anhand der beschriebenen Mechanismen der ISO/IEC 15118 Spezifikation darzustellen, wie ein solches E-Roaming-Szenario realisiert werden kann. Auf den ersten Blick mag diese Thematik etwas losgelöst von den vorherigen Kapiteln erscheinen, sie bildet jedoch eine wichtige Grundlage für die Diskussion der Zukunftsfähigkeit des ISO/IEC 15118 Standards in den Abschnitten 6.1.3 und 6.1.5.

## 5.1 Das Zertifikatskonzept gemäß ISO/IEC 15118-2

Die Informationen bezüglich des Zertifikatsmanagements basieren auf einem informativen Annex der ISO/IEC 15118-2 und stellen somit keine offizielle strikte Vorgehensweise dar, sondern eher eine Empfehlung gemäß dem besten Wissen der Autoren dieses Annexes. In [48] wurden bereits die wesentlichen Informationen zu diesem Verfahren publiziert, welche an dieser Stelle durch Details u. a. zu den kryptographischen Verfahren angereichert werden.

Das Zertifikatskonzept dieses Standards sieht diverse Zertifikatstypen vor, welche in einer zu etablierenden Public Key Infrastruktur (PKI) jeweils unterschiedliche Einsatzzwecke erfüllen. Eine PKI wird im Rahmen eines asymmetrischen Kryptographieverfahrens mit privaten und öffentlichen Schlüsseln dafür genutzt, die Authentizität eines öffentlichen Schlüssels sowie seinen zulässigen Anwendungs- und Geltungsbereich mittels signierten digitalen Zertifikaten zu überprüfen. Weitere Hintergrundinformationen zur Funktionsweise von asymmetrischen Kryptographieverfahren sowie einer PKI können bspw. [11] entnommen werden. Um das Zertifikatskonzept, welches in diesem informativen Annex beschrieben wird, besser verstehen zu können, müssen zuerst ein paar Anforderungen erklärt werden, die einerseits von der Automobilindustrie (fortlaufend OEM genannt) und andererseits bspw. von E-Mobilitätsanbietern (im Standard abstrakt als „secondary actors“ bezeichnet) aufgestellt werden.

### 5.1.1 Anforderungen aus Sicht eines OEMs

Ein OEM hat das Interesse, die Kosten für jegliche im Fahrzeug verbauten Komponenten, insbesondere auch Steuereinheiten wie den EVCC, möglichst gering zu halten. Solche Kosten lassen sich aufgrund der Skaleneffekte einer weltweiten Serienproduktion schon bei wenigen Centbeträgen deutlich reduzieren, weshalb auch ein genaues Auge auf die im Fahrzeug verbauten Speicherelemente und den benötigten Speicherplatz für die Kommunikation mit dem SECC geworfen wird. Des Weiteren ist ein manueller Eingriff bzw. eine Wartung einer im Fahrzeug verbauten Kommunikationskomponente durch eine Werkstatt für den Fahrzeugnutzer mit Unkosten und Zeitaufwand verbunden, was zugunsten der Nutzerakzeptanz möglichst vermieden werden sollte.

Die einfachste Art und Weise, ein Zertifikat im Fahrzeugspeicher ohne späteren Aufwand zu installieren, ist zur Produktionszeit des Fahrzeugs. Dies bringt es jedoch mit sich, dass

ein solches Zertifikat eine besonders lange Laufzeit haben müsste, mindestens so lange wie die Nutzungsdauer eines Fahrzeugs, die – orientiert man sich an der Garantiezeit für einen im Fahrzeug verbauten Lithium-Ionen-Akku – im Schnitt 8 bis 10 Jahre beträgt. Solche eher statischen Zertifikate können als sogenannte Root Zertifikate<sup>1</sup> in einer PKI zum Einsatz kommen.

Jedoch ist es durchaus denkbar und wahrscheinlich, dass der Vertrag, den ein Elektromobilist mit seinem E-Mobilitätsanbieter zum Zwecke der Autorisierung an öffentlichen Ladestationen abschließt, und das entsprechende Vertragszertifikat noch nicht zum Zeitpunkt der Produktion des Fahrzeugs existieren. Darüber hinaus kann es vorkommen, dass ein Kunde seinen E-Mobilitätsanbieter mit der Zeit wechseln möchte und somit auch ein solches Vertragszertifikat für das Plug-and-Charge Identifizierungsverfahren an die Gültigkeitsdauer des Vertrages gebunden ist. Aus diesen angeführten Gründen kann ein statisches Root Zertifikat, wie es zur Produktionszeit in das Fahrzeug integriert werden könnte, nicht für alle Zwecke in einer PKI genutzt werden. Ein viel praktischeres weil flexibleres Verfahren wäre die Installation eines solchen nicht-statischen Vertragszertifikats über das digitale Kommunikationsprotokoll ISO/IEC 15118.

Da, wie bereits erwähnt, selbst durch geringe Einsparungen im Bereich persistenter Speicher die Kosten durch die Skaleneffekte im Massenmarkt erheblich gesenkt werden können, sollte die Speichergröße eines solchen Vertragszertifikats, die Zertifikatskette von Root Zertifikat bis zum Vertragszertifikat sowie die Anzahl der abgespeicherten Root Zertifikate ebenfalls auf ein Minimum reduziert werden.

### 5.1.2 Anforderungen aus Sicht eines E-Mobilitätsanbieters

Der Betrieb einer PKI und die Ausstellung von Zertifikaten sollten möglichst geringen bürokratischen Aufwand erzeugen, infolge dessen die Abstimmungsprozesse zwischen den verschiedenen Firmen, die Teile einer PKI bilden, ebenfalls auf ein Minimum reduziert werden sollte.

Ein erster Ansatz wäre, alle an einer PKI beteiligten E-Mobilitätsanbieter (weltweit) in einer gemeinsamen Gruppe zu vereinen, welche auf ein und dasselbe Root Zertifikat zugreift, welches dann verteilt und in jedes Fahrzeug installiert wird. Alle weiteren Vertragszertifikate, welche durch die diversen E-Mobilitätsanbieter erstellt werden, könnten dann direkt von diesem Root Zertifikat abgeleitet und als vertrauenswürdig eingestuft werden, indem sie mit dem privaten Schlüssel des Root Zertifikats signiert werden. Anhand des öffentlich zugänglichen Schlüssels des Root Zertifikats kann diese Signatur dann mit einem entsprechenden kryptographischen Algorithmus entschlüsselt und die Echtheit und Vertrauenswürdigkeit dieser Signatur und im Umkehrschluss des Vertragszertifikats überprüft werden. Einzige Voraussetzung wäre, dass man sich auf die Vertrauenswürdigkeit einer obersten Zertifizierungsstelle, einer sogenannten Root Certificate Authority (Root-CA), einigt.

Es stellt sich jedoch in der Realität als eher schwierig heraus, eine oberste Zertifizierungsstelle weltweit zu etablieren, auf welche sich sämtliche Länder aller Kontinente einigen können. Aus diesem Grunde bietet sich ein alternativer Ansatz an, welcher mehrere Zertifizierungsstellen und Zertifikatstypen auf unterschiedlichen hierarchischen Stufen vorsieht. So könnte man bspw. für jeden der fünf Kontinente eine Zertifizierungsstelle errichten, welche jeweils ein Root Zertifikat erstellt. Des Weiteren ließe sich für jedes Land eines Kontinents eine Zwischen-Zertifizierungsstelle einrichten, die wiederum die darunter liegenden Zertifizierungsstellen eines

---

<sup>1</sup>Im Deutschen auch Wurzel- oder Stammzertifikat genannt. Dies ist ein unsigniertes oder selbstsigniertes Public-Key-Zertifikat einer obersten Zertifizierungsstelle (Root-CA), welches dazu verwendet wird, die Gültigkeit aller untergeordneten Zertifikate zu validieren.

jeden E-Mobilitätsanbieters zertifiziert, welcher in letzter Instanz die Vertragszertifikate für seine direkten Kunden ausstellt. Dieser hierarchische Zertifizierungsansatz, in welchem die jeweiligen Zwischen-Zertifizierungsstellen eigenverantwortlich weitere Zertifikate ausstellen und signieren können, erleichtert die Zertifikatsverwaltung und wird im besagten Annex des ISO/IEC 15118-2 vorgestellt.

Eine weitere Anforderung aus Sicht eines E-Mobilitätsanbieters, in diesem Fall eines Ladestationsbetreibers, ist die Reduktion der Kommunikationskosten für den Betrieb einer Ladestation. Dies bedeutet also, dass es vorteilhaft wäre, wenn die Ladestation während des gesamten Ladevorgangs offline bliebe und nicht für jeden Identifizierungsvorgang eine Online-Verbindung (über UMTS, GSM, LAN) aufbauen müsste.

### 5.1.3 Zertifikatstypen gemäß ISO/IEC 15118-2

Bevor in Abschnitt 5.1.4 auf die resultierenden Entscheidungen für das Zertifikatskonzept eingegangen wird, müssen ein paar Begrifflichkeiten eingeführt werden, welche für das weitere Verständnis des Konzepts unerlässlich sind.

#### **V2G Root Zertifikate**

Die V2G Root Zertifikate sind global gültige (top-level) Zertifikate der PKI. Sie bilden die oberste Vertrauensinstanz, auf Basis derer sämtliche weiteren abgeleiteten Zertifikate auf ihre Echtheit und Vertrauenswürdigkeit überprüft werden können. Die entsprechenden privaten Schlüssel sind im Besitz der jeweiligen Zertifizierungsstellen (Root-CAs). V2G ist eine Abkürzung für Vehicle-to-grid.

#### **Mobility Operator Root Zertifikat**

Dieser Zertifikatstyp wird dafür genutzt, über eine Kette von Sub-CAs die Vertragszertifikate zu signieren.

#### **Vertragszertifikat (Blattzertifikat)**

Im Falle des Plug-and-Charge Identifizierungsmodus' an einer Ladestation kommt dieses Zertifikat zum Einsatz, welches ein gültiges Vertragsverhältnis zwischen Elektromobilist und E-Mobilitätsanbieter widerspiegelt. Es wird im EVCC zusammen mit dem entsprechenden privaten Schlüssel abgespeichert. Das Elektrofahrzeug greift sodann auf dieses digitale Zertifikat zurück, um gegenüber der Ladestation die Existenz eines gültigen Fahrstromvertrages zu verifizieren. Vertragszertifikate sind von einem Mobility Operator Root Zertifikat abgeleitet.

#### **SECC Zertifikat (Blattzertifikat)**

Mit Hilfe dieses Zertifikats wird die Ladestation gegenüber dem E-Fahrzeug authentifiziert. Der zugehörige private Schlüssel ist im SECC abgespeichert. SECC Zertifikate (in Abbildung 5.1 mit „EVSE Leaf Certificate“ bezeichnet) sind von V2G Root Zertifikaten abgeleitet.

#### **OEM Provisioning Zertifikat (Blattzertifikat)**

Ein OEM Provisioning Zertifikat (Bereitstellungszertifikat) wird individuell für jedes Elektrofahrzeug ausgestellt und zur Produktionszeit im EVCC des Fahrzeugs installiert. Es dient zur Verifizierung der Identität des entsprechenden Elektrofahrzeugs zu Beginn eines Bereitstellungsprozesses (siehe Abschnitt 5.1.5) und ist vom OEM Root Zertifikat abgeleitet.

### OEM Root Zertifikat

Das OEM Root Zertifikat wird zur Signierung eines OEM Provisioning Zertifikats genutzt. Jeder OEM kann sein eigenes (top-level) Root Zertifikat erzeugen und dieses dann an die E-Mobilitätsanbieter und Clearingstellen verteilen. Das Root Zertifikat eines OEMs ist nicht Bestandteil einer globalen PKI, d.h. es ist auch nicht zwangsweise von einem V2G Root Zertifikat signiert.

Abbildung 5.1 liefert einen zusammenfassenden Überblick der verschiedenen Zertifikatstypen.

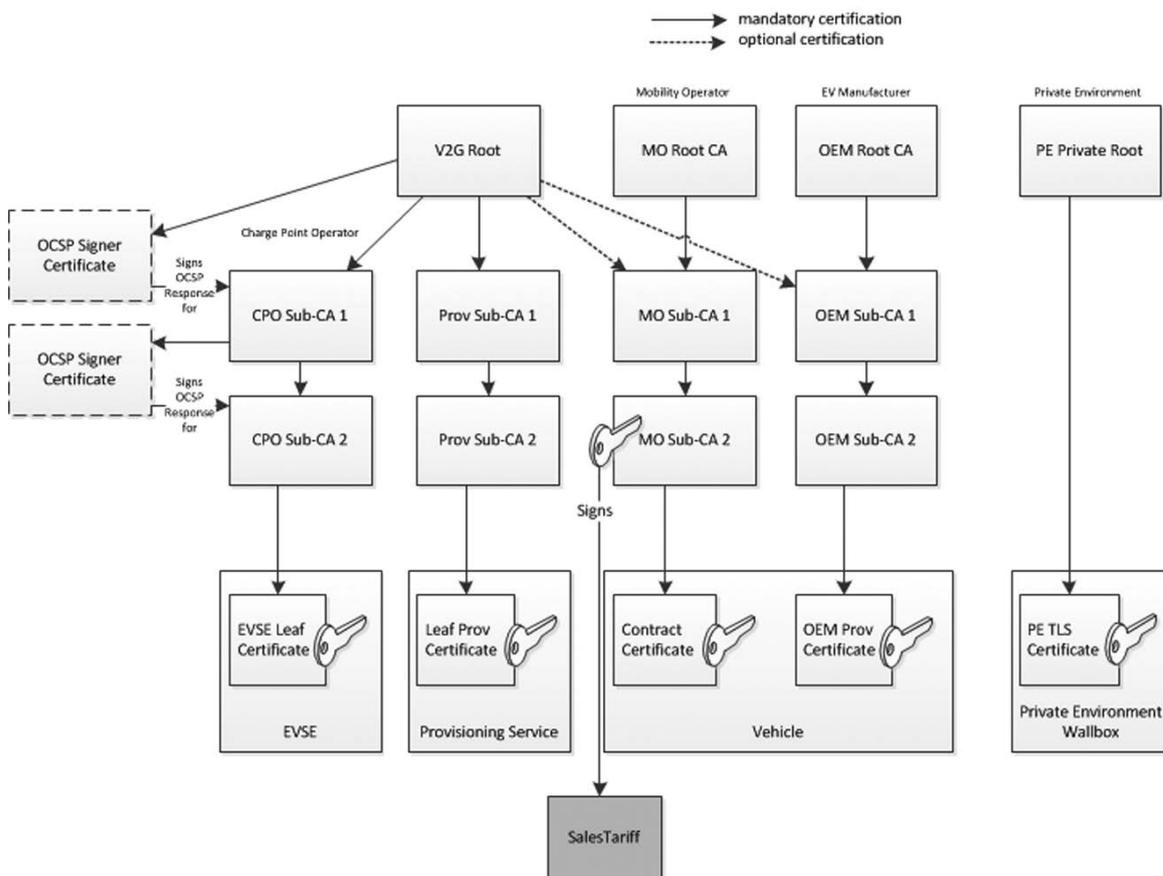


Abbildung 5.1: Überblick über die diversen Zertifikatstypen, welche im Rahmen des Plug-and-Charge Identifikationsmodus' gemäß ISO/IEC 15118-2 zum Einsatz kommen [39]

Sämtliche in der oberen Auflistung als „Blattzertifikat“ gekennzeichneten Zertifikate entsprechen den Zertifikaten am untersten Ende der vier-elementigen Verifizierungskette, das heißt, dass keine weiteren Zertifikate mehr von ihnen abgeleitet (signiert) werden können. In diesem Überblick sind ebenfalls sogenannte Provisioning Sub-CAs (Prov Sub-CA) aufgeführt. Die Rolle des Certificate Provisioning Service, also des Validierungsdienstes, kann auch durch den Mobility Operator (der E-Mobilitätsanbieter), dem CPO (Charge Point Operator = Ladestationsbetreiber) oder eine gänzlich andere Instanz ausgeführt werden. Ein solcher Validierungsdienst hat die Aufgabe zu überprüfen, ob die Zertifikate, die zur Prüfung der

jeweiligen Signatur verwendet werden, gesperrt und damit bereits vor Ende ihres regulären Gültigkeitszeitraums ungültig wurden. Das Online Certificate Status Protocol (OCSP) ist das entsprechende Internet-Protokoll, über welches die Validierung durchgeführt werden kann.

#### 5.1.4 Resultierende Entscheidungen als Basis für das Zertifikatskonzept

Basierend auf den vorgestellten Anforderungen eines OEMs und E-Mobilitätsanbieters, welche in mancher Hinsicht widersprüchlich sind, wurde ein Konzept für die Erstellung, Verteilung, Nutzung und Verwaltung diverser Zertifikate für das Plug-and-Charge Szenario erstellt. Dieses Zertifikatskonzept stellt an gewissen Stellen einen Kompromiss dar, der zwischen den verschiedenen Interessensgruppen geschlossen wurde.

##### Speichergröße eines einzelnen Zertifikats

Jegliches Zertifikat soll dem X.509<sup>2</sup> Format entsprechen, welches ein strikt hierarchisches System von vertrauenswürdigen Zertifizierungsstellen voraussetzt. Die Größe eines solchen Zertifikats soll 800 Bytes nicht überschreiten, was u. a. dadurch erreicht werden kann, dass irrelevante Informationen wie die Adresse des Zertifikatsausstellers ausgespart werden.

##### Länge einer Zertifikatskette

Bei der Länge der Zertifikatskette einer solchen PKI treten die konfligierenden Interessen der OEMs und der E-Mobilitätsanbieter zutage. Während einerseits der Speicherplatz im EVCC für abzuspeichernde Zertifikate möglichst gering gehalten werden soll, verringert andererseits eine entsprechend lange Zertifikatskette den Abstimmungsaufwand zwischen verschiedenen Firmen, die direkt Vertragszertifikate ausstellen möchten, und offiziellen Organisationen, die als vertrauenswürdige oberste Zertifizierungsstelle auftreten. Als Kompromiss hat man sich auf eine maximal vierstufige Zertifikatskette geeinigt, bestehend aus dem Root Zertifikat (erstellt von der Root-CA), gefolgt von maximal zwei Zwischen-Zertifikaten (ausgestellt durch sogenannte Sub-CAs) und dem finalen Blattzertifikat (Vertragszertifikat oder SECC-Zertifikat), welches das Ende der Kette bildet. Diese vierstufige Zertifikatskette ist neben den Zertifikatstypen an sich ebenfalls durch Abbildung 5.1 illustriert.

Konkret könnte man sich die Instanzen dieser Kette folgendermaßen vorstellen: Auf jedem Kontinent könnte eine einzelne Organisation (Root-CA) dafür zuständig sein, ein V2G Root Zertifikat auszustellen. Nun könnte eine beliebige Anzahl an untergeordneten Zertifizierungsstellen errichtet werden, die bspw. entweder jeweils ein Land dieses entsprechenden Kontinents (Sub-CA auf Landesebene) oder – gemäß der Deutung aus Abbildung 5.1 – einen Ladestationsbetreiber (CPO Sub-CA 1) bzw. E-Mobilitätsanbieter (MO Sub-CA 1) repräsentieren. Bei entsprechend großen Firmen ist es nicht unüblich, dass diverse Zertifizierungsstellen für verschiedene Zwecke zum Einsatz kommen, wie etwa eine Sub-CA für Mitarbeiterzertifikate oder eine Sub-CA für SSL-Zertifikate, die allesamt unter einer gemeinsamen Firmen Root-CA stehen. Ein E-Mobilitätsanbieter könnte somit eine eigene weitere Zwischenzertifikatsstelle (MO Sub-CA 2) betreiben, die eigens dafür genutzt wird, Ladestromverträge (Contract Certificate) mit ihrem privaten Schlüssel zu signieren.

Laut der Spezifikation müssen lediglich Ladestationsbetreiber-Zertifikate sowie Ladestationszertifikate von der V2G Root abgeleitet werden (mandatory certification), wohingegen E-Mobilitätsanbieter entscheiden können, ob sie selbst eine Root-CA samt der damit einhergehenden hohen Sicherheitsrichtlinien betreiben oder diese Aufgabe lieber einer bereits

---

<sup>2</sup><http://www.ietf.org/rfc/rfc2459.txt>

bestehenden V2G Root-CA übergeben wollen (optional certification).

#### **Anzahl der Root Zertifikate**

Als Kompromisslösung wird gefordert, mindestens ein V2G Root Zertifikat im EVCC eines E-Fahrzeugs zu installieren, wobei ein Minimum an fünf (entsprechend der Anzahl der Kontinente) solcher Zertifikate empfohlen wird.

Für den SECC wird ein Minimum an zehn V2G Root Zertifikaten gefordert, was u. a. mit sich überschneidenden Gültigkeitsdauern auslaufender und neuer Zertifikate begründet wird. Diese größere Anzahl an zu speichernden Zertifikaten ist dadurch begründet, dass die Speichergröße eines SECC (noch) nicht in der Art einem Kostendruck durch Skaleneffekte ausgesetzt ist, wie es beim EVCC der Fall ist.

#### **Gültigkeit eines Root Zertifikats**

Da Root Zertifikate möglichst selten installiert werden sollten, idealerweise einmal zur Produktionszeit des Elektrofahrzeugs, wurde festgelegt, dass ein solches Zertifikat eine Gültigkeit von 40 Jahren haben soll. Dieser Zeitraum deckt die übliche Nutzungsdauer eines Fahrzeugs bei weitem ab.

#### **Gültigkeit eines OEM Provisioning Zertifikats**

Neue OEM Bereitstellungs-zertifikate sollen eine Gültigkeit von 30 Jahren aufweisen.

#### **Installation von Vertragszertifikaten**

Vertragszertifikate sollen über die Mechanismen des ISO/IEC 15118 Kommunikationsprotokolls installiert und aktualisiert werden, insbesondere kommen hier die Nachrichtenpaare `CertificateInstallationReq/-Res` und `CertificateUpdateReq/-Res` zum Einsatz.

#### **Gültigkeit von Vertragszertifikaten**

Die minimale Gültigkeitsdauer eines solchen Zertifikats beträgt 4 Wochen, es sei denn die Gültigkeitsdauer eines abgeschlossenen Vertrags ist kürzer.

#### **Gültigkeit von SECC Zertifikaten**

Die Gültigkeitsdauer eines SECC Zertifikats ist nicht näher angegeben, es ist in der Spezifikation lediglich von einer „kurzen“ Zeitdauer die Rede.

### **5.1.5 Initialer Bereitstellungsprozess (Certificate Provisioning)**

Es wurde bereits motiviert, dass die Installation eines Vertragszertifikats möglichst durch einen automatisierten Prozess geschehen sollte, um den damit verbundenen Aufwand sowie die Kosten für den Elektromobilisten auf ein Minimum zu reduzieren. Jener Prozess wird in der ISO/IEC 15118-2 Spezifikation als „Certificate Provisioning“ bezeichnet, was soviel bedeutet wie Zertifikatsbereitstellung. Mit Hilfe des `CertificateInstallationReq/-Res` Nachrichtenpaares kann das vom E-Mobilitäts-Anbieter bereitgestellte Vertragszertifikat im Fahrzeug installiert werden. Im Zuge dieser Zertifikatsbereitstellung bedarf es weniger Prozessschritte, die nur zum Teil über das Ladeprotokoll abgewickelt werden können und zusammenfassend in Abbildung 5.2 dargestellt werden.

Im ersten Schritt  $\Phi$  wird in jedes neu produzierte Elektrofahrzeug ein individuelles OEM Provisioning Zertifikat samt des dazugehörigen privaten Schlüssels installiert, welches vom



Abbildung 5.2: Prozessschritte im Zuge der Bereitstellung des Vertragszertifikats (angelehnt an [39])

OEM Root Zertifikat abgeleitet und mit dessen privaten Schlüssel signiert wurde. Jedes OEM Provisioning Zertifikat ist mit einer eindeutigen Kennung, der Zertifikats-ID, ausgestattet.

Sobald nun ein Kunde ein neues Elektrofahrzeug kauft  $\mathcal{Q}$ , wird er über die Zertifikats-ID des im Fahrzeug installierten Provisioning Zertifikats informiert. Dies kann bspw. über eine Information im Fahrzeughandbuch, ein separates Informationsblatt oder auch einen Onlinezugang zur entsprechenden OEM-Plattform geschehen.

Bei Abschluss eines neuen Fahrstromvertrages  $\mathcal{Q}$ , mit Hilfe dessen der Kunde sich an öffentlichen Ladestationen für das Aufladen seines Elektrofahrzeugs autorisieren lassen möchte, sendet der Fahrzeugnutzer die Zertifikats-ID des OEM Provisioning Zertifikats zusammen mit seinem unterschriebenen Vertrag an seinen Vertragspartner. Dies kann z. B. ein Energieversorgungsunternehmen (EVU) oder ein beliebiger anderer E-Mobilitätsanbieter sein. Der Vertragspartner ordnet nun die Zertifikats-ID dem entsprechenden Vertrag in seinem IT-System zu und erstellt ein neues Vertragszertifikat, welches ebenfalls an die übermittelte Zertifikats-ID des Provisioning Zertifikats gebunden ist. Die Information über einen bestehenden Fahrstromvertrag in Zusammenhang mit der Zertifikats-ID des Provisioning Zertifikats des Kunden wird sodann an eine Clearingstelle (Abrechnungsstelle) des entsprechenden Landes weitergeleitet. Idealerweise wird bei dieser Benachrichtigung gleich das entsprechende Vertragszertifikat mitgeliefert, um beim späteren Autorisierungsprozess an der Ladestation Kommunikationsverzögerungen zu vermeiden.

Wann immer der Elektromobilist sein Elektrofahrzeug an einer öffentlichen Ladestation laden möchte  $\mathcal{Q}$ , weist sich die Ladestation gegenüber dem Fahrzeug mittels des **AuthenticationReq/-Res** Nachrichtenpaars als vertrauenswürdig aus. Anschließend legen beide gemeinsam einen Sitzungsschlüssel zur abgesicherten Datenübertragung fest. Weitere Details zum Schlüsselaustausch können auch Abschnitt 6.1.3 entnommen werden. Im weiteren Verlauf sendet der EVCC das OEM Provisioning Zertifikat an die Ladestation. Im Falle des ersten Ladevorgangs überhaupt geschieht dies mittels der **CertificateInstallationReq** Nachricht, im Falle eines abgelaufenen Gültigkeitsdatums mittels der **CertificateUpdateReq** Nachricht. Diese wiederum leitet das Zertifikat bspw. über das Open Charge Point Protocol (OCPP), auf welches in Abschnitt 2.2.2 bereits eingegangen wurde, an das Backend des Ladestationsbetreibers weiter. In nächster Instanz kommuniziert das Backend mit der Clearingstelle über ein Protokoll, welches diese zur Verfügung stellt. Ein deutschland- und europaweit prominentes Beispiel für ein solches Clearingstellen-Protokoll ist das *Open InterCharge Protocol (OICP)*, welches in Abschnitt 5.2.1 näher betrachtet wird. Falls in einem Land keine Clearingstelle existiert, so wird diese Information an alle der Ladestation bekannten E-Mobilitätsanbieter weitergeleitet. Die Clearingstelle überprüft dann, ob das OEM Provisioning Zertifikat gültig ist, indem der öffentliche Schlüssel des entsprechenden OEM Root Zertifikats, welches vom OEM der Clearingstelle bereits zur Verfügung gestellt wurde, zur Verifikation herangezogen wird. Daraufhin wird überprüft, ob bei der Clearingstelle ein Vertragszertifikat registriert ist, welches der Zertifikats-ID des Provisioning Zertifikats zugeordnet wurde.

Im letzten Schritt wird das passende Vertragszertifikat (inkl. der Zertifikatskette, die zur Validierung des Vertragszertifikats vonnöten ist) und der dazugehörige private Schlüssel (dieser wiederum über ein symmetrisches Kryptoverfahren verschlüsselt, siehe Abschnitt 6.1.3) an die Ladestation und von dieser mittels der **CertificateInstallationRes** Nachricht an das Elektrofahrzeug gesendet.

Auf den ersten Blick erscheint das Zertifikatskonzept sowie das Bereitstellungsprozedere als ein komplexer Mechanismus, welcher sich erst als praktikabler Ansatz beweisen muss, sobald

die entsprechenden Akteure am Markt dies in ihren Lösungen umsetzen.

Im März 2014 hat Hsubject damit begonnen, die angeblich weltweit erste produktive E-Mobility-Zertifizierungsstelle für Stammzertifikate in Betrieb zu nehmen [34]. Somit tritt dieses Joint Venture als erste europäische Root-CA zur Ausstellung der V2G Root Zertifikate für Automobilhersteller, Ladeinfrastrukturbetreiber und Fahrstromanbieter auf. Das Wissen um die Richtlinien und die entsprechende Technologie, die zum Betreiben einer PKI vonnöten ist, wird hierbei von der IT-Sicherheitsfirma *secunet*<sup>3</sup> bereitgestellt.

Das hier vorgestellte Zertifikatsverfahren ist das bis dato einzig beschriebene Verfahren, welches ein E-Roaming Szenario im Bereich der Elektromobilität ermöglicht. Somit können Anwendungsfälle abgedeckt werden, in denen ein Elektromobilist öffentliche Ladestationen nutzen möchte, die nicht von seinem Vertragspartner direkt verwaltet werden, sei es anbieterübergreifend auf nationaler Ebene oder gar international. Das Hsubject-Netzwerk umfasst bereits europäische Roaming-Partner aus Belgien, Frankreich, Österreich, Finnland, den Niederlanden und der Schweiz. Dies mindert die Reichweitenangst der E-Fahrzeug-Nutzer und erhöht die Akzeptanz für die E-Mobilität im Allgemeinen, da somit ein Kunde bspw. nicht mehr mehrere RFID-Karten verschiedener Hersteller mit sich führen muss, um sich an der entsprechenden Ladestation zu authentifizieren und zu autorisieren.

Je mehr Marktteilnehmer sich einer solchen E-Roaming-Plattform anschließen, umso besser lässt sich die Vision eines nutzerfreundlichen und einfachen E-Roaming-Prozesses realisieren. Ziel ist es, dass sich der Kunde keine Gedanken um die Möglichkeit, an einer beliebigen öffentlichen Ladestation seine Batterie wieder aufzuladen, mehr machen muss. Bevor nun in Abschnitt 5.2 anhand des Joint Ventures Hsubject, welches als Clearingstelle im oben genannten Kontext auftreten möchte, dargelegt wird, wie ein solches Roamingnetzwerk aufgebaut sein könnte, soll im folgenden Abschnitt der Vollständigkeit halber noch auf das vereinfachte Zertifikatsmanagement-Konzept im privaten Umfeld eingegangen werden.

### 5.1.6 Vereinfachtes Zertifikatsmanagement im privaten Umfeld

Das bisher beschriebene Prozedere des Zertifikatsmanagements ist vor allem auf das Laden an öffentlichen Ladestationen ausgerichtet. Jedoch ist davon auszugehen, dass das Gros der Ladevorgänge im privaten Bereich zu Hause oder am Arbeitsplatz an sogenannten halb-öffentlichen Ladestationen erfolgen wird. Gerade für den Betreiber einer elektrifizierten Unternehmensflotte sind folgende Aspekte interessant:

- Es ist kein E-Mobilitätsanbieter involviert, über den die bezogene elektrische Energie abgerechnet werden müsste. Das bedeutet auch, dass keine Kommunikation in ein Backend nötig ist, was zusätzliche Tarifikosten mit sich bringen würde.
- Die Instandhaltung und der Betrieb einer Ladestation müssen einfach und kostengünstig sein, sodass es keiner manuellen Interaktionen mehr bedarf. Kurzlebige Zertifikate sind nicht geeignet.
- Es sollte dennoch möglich sein, den einzelnen E-Fahrzeugen eine Ladekurve zu kommunizieren, um einen gesteuerten Ladevorgang realisieren zu können.

Für das Zertifikatsmanagement im semi-öffentlichen und privaten Umfeld liefert die ISO/IEC 15118-2 Spezifikation ebenfalls einen Vorschlag, wie Zertifikate einzusetzen sind, wie bereits in [48] vorgestellt.

---

<sup>3</sup><http://www.secunet.com>



Es werden grundsätzlich zwei verschiedene Geschäftsrollen nach dem Hsubject-Marktverständnis unterschieden, die ein Marktteilnehmer einnehmen kann: Ladestationsbetreiber oder E-Mobilitätsanbieter.

Der Ladestationsbetreiber ist für den Betrieb der Ladeinfrastruktur sowie die Versorgung der einzelnen Ladestationen mit Energie zuständig. Diese Rolle kann bspw. von Energieversorgungsunternehmen, aber auch von neuen Akteuren am Markt eingenommen werden, wie bspw. auch einem OEM, der sein eigenes Ladestationsnetzwerk für seine Fahrzeuge betreibt. Am Beispiel der Firma Tesla und ihrer Pläne, auch in Deutschland ein flächendeckendes Netz an Schnellladestationen (Supercharger) aufzustellen, tritt diese Rolle besonders deutlich zu Tage. Allerdings ist es noch unklar, ob sich Tesla einem Netzwerk wie Hsubject öffnen würde, da die Firma ihre Supercharger als Premiumangebot für Teslakunden offeriert und somit der Fall eintreten könnte, dass zukünftig ein Tesla-Fahrer nicht mehr an einer Supercharger-Schnellladestation laden kann, weil z. B. ein BMW-Fahrer diese gerade blockiert. Es sollte erwähnt werden, dass streng genommen das Betreiben der Ladeinfrastruktur vom Energieversorgerstatus zu trennen ist, da diese Rolle nicht immer auf einen Marktakteur vereint werden kann. Diese Trennung wird im abgebildeten Rollenmodell jedoch nicht streng vollzogen. Es bietet lediglich eine einfach verständliche Darstellung, in welcher nicht jeder mögliche Partnerstatus abgebildet wird. Insbesondere die Fahrzeughersteller und Flottenbetreiber finden sich hier nicht wieder.

Der E-Mobilitätsanbieter bietet den Kunden Dienstleistungen rund um die E-Mobilität an, im speziellen bspw. Fahrstromverträge. Ein Partner des Hsubject-Netzwerks kann auch beide Rollen auf sich vereinen, wie es z. B. beim Gründungsmitglied RWE der Fall ist.

Das Konzept eines nutzerfreundlichen Roaming-Vorgangs würde laut Abbildung 5.3 nun folgendermaßen ablaufen: Ein Fahrer eines Elektrofahrzeugs schließt einen Vertrag mit dem E-Mobilitätsanbieter seines Vertrauens ab, welcher als Partner im Hsubject-Netzwerk registriert sein muss. Fährt dieser Kunde nun eine Ladestation eines Hsubject-Partners an, um dort sein E-Fahrzeug zu laden, so authentifiziert und autorisiert er sich über eines der angebotenen Medien. Bisher ist die Identifikation über eine RFID-Karte des Vertragspartners oder die Hsubject-eigene App möglich, mit Hilfe derer man den auf der Hsubject-zertifizierten Ladestation aufgebrachten QR-Code scannen kann. Zukünftig soll auch der Weg über den Plug-and-Charge Mechanismus möglich sein. Die Ladestation kommuniziert diese Benutzerdaten samt der Ladestations-ID an das Ladestations-Management-System des Ladestationsbetreibers über das Protokoll OCPP. Dieses Backend-System muss informationstechnisch an die Hsubject-Plattform angebunden sein, welches über das OICP-Protokoll (siehe Abschnitt 5.2.1) realisiert wird. Über diese IT-Plattform, welche vom Gründungsmitglied Bosch Software Innovations konzipiert wurde und betrieben wird, ist es nun möglich, relevante Informationen zwischen allen Partnern des Hsubject-Netzwerks auszutauschen, die entsprechenden Autorisierungsvorgänge somit durchzuführen und Abrechnungsprozesse für die Nutzung des Roaming-Dienstes unter den Partnern anzustoßen. Das Kunden-Management-System des Vertragspartners des Elektromobilisten ist ebenfalls an die IT-Plattform angebunden und kann die Nutzung der Ladesäule basierend auf den Authentifizierungsdaten autorisieren.

Laut einer Pressemitteilung<sup>4</sup> vom 4. April 2014 sind europaweit bereits 2000 Ladepunkte an das Hsubject-Netzwerk angeschlossen.

Hsubject ist nicht das einzige existierende Roaming-Netzwerk, aber das europaweit bisher größte und ambitionierteste Unternehmen in diesem Bereich. Weitere etablierte und in

---

<sup>4</sup>[http://www.hsubject.com/pdf/PM\\_hsubject\\_20140404.pdf](http://www.hsubject.com/pdf/PM_hsubject_20140404.pdf)

Deutschland aktive E-Roaming-Netzwerke sind bspw. Trianel, eine europaweite Stadtwerke-Kooperation, und die smartlab Innovationsgesellschaft, welche die Plattform <http://ladenetz.de> betreibt, über die bereits 33 Stadtwerke miteinander kooperieren. Die beiden Aachener Unternehmen, die zusammen nun 88 Stadtwerke vereinen, unterzeichneten auf der E-world 2014<sup>5</sup> einen Kooperationsvertrag, dessen Ziel die gemeinsame Entwicklung eines Geschäftsmodells ist, welches letzten Endes einen barrierefreien Zugang zur Ladeinfrastruktur für Elektromobilisten bereitstellen soll [69].

Um Synergien bestmöglich zu nutzen, wäre es eher hinderlich, wenn diese unterschiedlichen Roaming-Netzwerke in Konkurrenz zueinander treten würden. Angesichts der stellenweise noch recht geringen Auslastung öffentlicher Ladestationen ist eine Kooperation innerhalb dieser E-Roaming-Netzwerke sogar vorteilhaft für jeden Ladestationsbetreiber, da somit der Energiedurchsatz insgesamt erhöht werden könnte. Daher verfolgt Hubject ein Konzept, welches sich „Hubbing the Hub“ nennt und über die Abbildung 5.4 verdeutlicht werden soll.

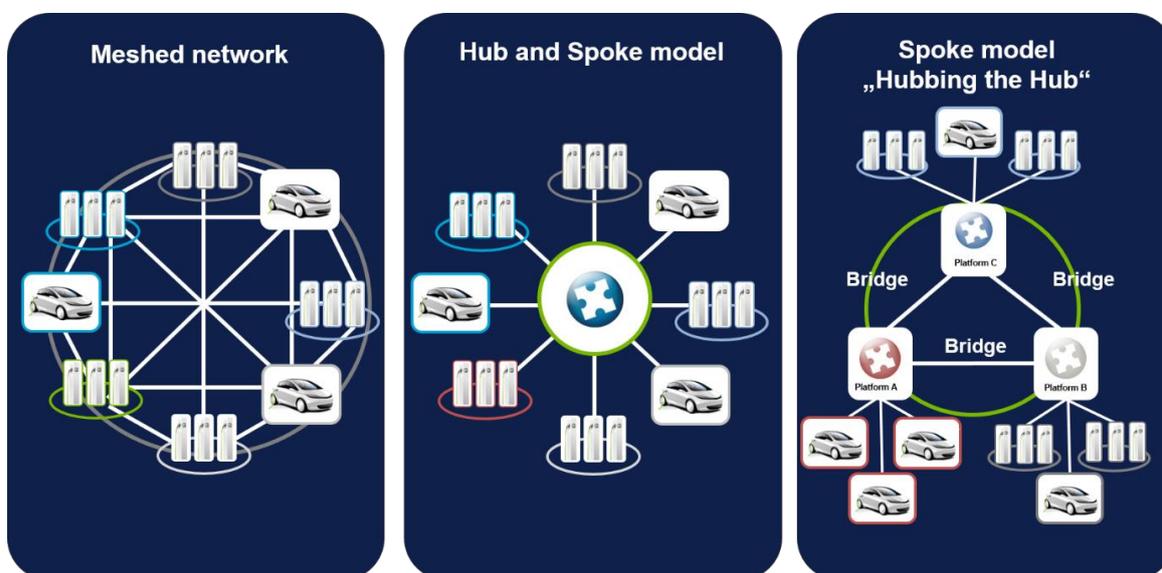


Abbildung 5.4: Hubject Rollenmodell im E-Roaming Szenario [33]

Im linken Bild „Meshed network“ ist das Szenario verbildlicht, in welchem eine Vielzahl an bilateralen Nutzungsverträgen nötig ist, damit jeder Kunde eines E-Mobilitätsanbieters an den Ladestationen eines anderen Anbieters sein Fahrzeug laden kann. Das mittlere Bild illustriert den Fall eines gemeinsamen vertraglichen Rahmenwerks und einer technischen Schnittstelle, wie es Hubject anbietet, auf welches sich alle E-Mobilitätsanbieter einigen. Im Falle bereits existierender Rahmenwerke, die verschiedene Akteure in einem Netzwerk unter einem jeweiligen Dach vereinen, wie es z. B. mit Trianel oder smartlab der Fall ist, können diese Netzwerke über das „Hubbing the Hub“ Speichenmodell (Spoke model) gemeinsam mit der Hubject Plattform verbunden werden. Es bedarf dann lediglich einer Verbindung zwischen einem Vertreter des Netzwerks und der Hubject Plattform.

<sup>5</sup><http://www.e-world-essen.com/de/>

### 5.2.1 Das Open InterCharge Protocol (OICP)

Hubject veröffentlichte sein Open InterCharge Protocol [32] im April 2013. Der Informationsaustausch zwischen der Hubject Plattform und dem IT-System eines E-Mobilitätsanbieters (*E-Mobility Provider (E-MP)*) bzw. Ladestationsbetreibers (*Charge Point Operator (CPO)*) basiert mit Version 1.0 des Protokolls auf SOAP-Nachrichten (Simple Object Access Protocol), über die die folgenden fünf Dienste offeriert und in Anspruch genommen werden können.

#### HubjectAuthorization

Dieser Dienst muss von Hubject sowie den E-MPs offeriert werden und dient der Autorisation eines Ladevorgangs an einer Ladestation. Die Autorisation kann über mehrere Stufen erfolgen. In erster Linie wird das Backend-System des CPO versuchen, den Ladevorgang anhand der Authentifizierungsdaten selbst zu autorisieren. Ist dem CPO dieser Nutzer nicht bekannt, so wird eine `HubjectAuthorizeStart` Nachricht an Hubject gesendet, welche die ID des CPOs und die Authentifikationsdaten (z. B. die Vertrags-ID) beinhalten muss und optional die Ladepunkt-ID<sup>6</sup> mitführen kann. Anschließend gibt es drei Optionen:

1. Hubject versucht offline die Authentifizierungsdaten einem gültigen Vertrag mit einem registrierten E-MP zuzuordnen. Diese Daten können von den E-MPs durch den `HubjectAuthenticationData`-Dienst bereitgestellt werden.
2. Falls keine Autorisierung offline möglich ist, wird versucht, die `HubjectAuthorizeStart` Nachricht direkt an den entsprechenden E-MP weiterzuleiten. Im Falle der Authentifizierung mittels eines QR-Codes oder des Plug-and-Charge Mechanismus wird bereits die Vertrags-ID mitgeliefert, anhand derer der zugehörige E-MP auffindig gemacht werden kann. Dieser wird dann mit einer Bestätigung oder Ablehnung der Anfrage antworten. Ist aus technischen Gründen der E-MP nicht kontaktierbar, wird die Autorisierung ebenfalls als fehlgeschlagen gewertet.
3. Falls der zugehörige E-MP nicht aus den Authentifizierungsdaten abgeleitet werden kann, wie es bei einer RFID-Karte der Fall ist, so sendet Hubject in einer Broadcast Nachricht die Authentifizierungsanfrage an alle E-MPs weiter, die über die Hubject-Plattform in einem Vertragsverhältnis mit dem CPO der betreffenden Ladestation stehen.

Ist der Ladevorgang erst einmal autorisiert, so werden wichtige Sessiondaten, wie bspw. die `SessionID`, `EVSEID` und die Authentifikationsdaten, persistiert. Die im OICP definierten Nachrichten, welche dem `HubjectAuthorization`-Dienst zugeordnet sind, erlauben neben der Ladeautorisation direkt vor Ort an der Ladestation auch eine Fernbedienung bspw. über eine App. Im Anschluss an eine Ladesession wird ein sogenannter `ChargeDetailRecord` dem E-MP bereit gestellt, welcher über die bezogene Energiemenge informiert.

#### HubjectEvseSearch

Dieser Dienst muss ebenfalls sowohl von Hubject als auch von den E-MPs offeriert werden und dient dazu, in einem bestimmten Gebiet sämtliche Ladestationen aller CPOs aufzulisten, mit denen der E-MP über die Hubject Marktplattform einen Vertrag abgeschlossen hat. Somit kann einem Nutzer über eine vom E-MP bereitgestellte graphische Benutzungsschnittstelle eine solche Übersicht dargestellt werden. Innerhalb einer `HubjectSearchEvse` Nachricht müssen die `ProviderID` des E-MP sowie geographische Angaben, seien es Geokoordinaten oder eine

---

<sup>6</sup>Eine Ladestation (EVSE) kann mit mehreren Ladepunkte ausgestattet sein.

bestimmte Adresse, samt optionaler einschränkender Parameter wie bspw. der Umkreis des Suchfeldes enthalten sein.

Diese Dienstbeschreibung macht noch einmal das Geschäftsverständnis des Hsubject Konsortiums deutlich: Anstatt diverser Schnittstellen für die Kommunikation zwischen mehreren proprietären Systemen soll lediglich eine B2B-Marktplattform mit einer einheitlichen IT-Schnittstelle geschaffen werden, über welche die teilnehmenden Partner bilaterale Roaming-Verträge mit freier Preisgestaltung abschließen können. Dies bedeutet, dass ein E-MP nicht notwendigerweise sogleich mit allen Partnern des Hsubject-Netzwerks ein Roaming-Abkommen geschlossen hat, sobald er selbst Partner des Netzwerks geworden ist. Zugleich bedeutet dies für den Nutzer, dass er bei einer Ladestationssuche, die er über eine Benutzungsschnittstelle seines Vertragspartners (E-MP) durchführt, nicht notwendigerweise alle an das Hsubject-Netzwerk angebundene Ladestationen auf der Ergebnisliste finden wird. Es sollte jedoch das Ziel sein, dass sich alle Vertragspartner untereinander tariflich einig werden, sodass für den Endkunden der bestmögliche Nutzen gewährleistet werden kann.

### **HsubjectEvseData**

Dieser Dienst wird nur von Hsubject angeboten und erlaubt es, Authentifizierungsdaten zwischen verschiedenen Hsubject Partnern auszutauschen. Die Beschreibung des **HsubjectAuthorization**-Dienstes legt dar, wie über die Hsubject IT-Plattform Autorisierungsanfragen online an den entsprechenden E-MP weitergeleitet werden können. Mit Hilfe des **HsubjectEvseData**-Dienstes ist es einerseits den E-MPs möglich, Authentifizierungsdaten auf die Hsubject IT-Plattform hochzuladen und andererseits ermöglicht es den CPOs, diese Daten auf ihre eigenen Systeme herunterzuladen. Dies hat den Vorteil, dass im Idealfall eine Autorisierung einer Ladeanfrage direkt durch das IT-System des entsprechenden CPOs erfolgen kann, ohne dass eine zeitliche Verzögerung über die Hsubject IT-Plattform vonnöten ist.

### **HsubjectEvseStatus**

Hsubject erlaubt es, dynamische und statische Informationen über Ladestationen über seine Plattform zwischen verschiedenen Partnern auszutauschen. Dieser Dienst wird bspw. von E-MPs in Anspruch genommen, um einem Kunden über eine Benutzungsschnittstelle die Liste aller Ladestationen in einem angegebenen radialen Umfeld zusammen mit ihrem Belegungsstatus anzuzeigen, ggf. mit der Option, eine freie Ladestation gleich zu reservieren.

Die Sicherheitsaspekte betreffend kann an dieser Stelle keine Aussage zum OICP gemacht werden, da das Protokoll hierzu keinerlei Auskunft gibt.

Hsubject ist im Bereich des E-Roaming nicht die einzige Initiative, jedoch scheint sie mit Abstand die größte Anzahl an Partnern im operativen Betrieb zu haben.

Darüber hinaus existiert mit [e-clearing.net](http://www.e-clearing.net)<sup>7</sup> ein Zusammenschluss der drei europäischen Ladenetzbetreiber Blue Corner (Belgien), Ladenetz.de (Deutschland) und e-laad.nl (Niederlande). Die Kunden von [e-clearing.net](http://www.e-clearing.net) können basierend auf dem auf SOAP-Nachrichten basierenden, offenen Open Clearing House Protocol (OCHP) somit an allen bisher ca. 1.500 Ladestationen, die zu diesem Bezahlssystem-Verbund gehören, ihre Fahrzeuge aufladen. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch nicht näher auf dieses Netzwerk eingegangen.

Stattdessen soll abschließend das europäische Forschungsprojekt Green eMotion kurz beleuchtet werden, dessen 43 Partner aus Industrie- und Automobilunternehmen, Stromversorgern, Stadtverwaltungen sowie Forschungseinrichtungen das Ziel verfolgen, einen kundenfreundlichen

---

<sup>7</sup><http://www.e-clearing.net>

und interoperablen E-Mobilitäts-Marktplatz auf Basis einer B2B-Plattform zu entwickeln und zu demonstrieren.

### 5.3 Green eMotion – Europäischer Marktplatz aus der Forschungsperspektive

Das Projekt Green eMotion wurde am 31. März 2011 von der Europäischen Kommission ins Leben gerufen und hat eine Laufzeit von vier Jahren, innerhalb derer die Grundlagen für einen europaweiten Massenmarkt der Elektromobilität geschaffen werden sollen<sup>8</sup>. Mit einem Projektbudget von 42 Millionen Euro soll ein europäischer virtueller Marktplatz für E-Mobilitäts-Dienste implementiert werden, welcher dazu dient, in ausgewählten Demonstrationsregionen in ganz Europa die Interoperabilität eines verbraucherfreundlichen E-Mobilitäts-Systems sowie sinnvolle E-Mobilitäts-Mehrwertdienste zu testen.

Im Rahmen dieses Projekts wird eine IT-Infrastruktur samt der nötigen Schnittstellen zur Erstellung, Verwaltung und Nutzung diverser Dienste für einen solchen europäischen Marktplatz definiert und implementiert. In der Terminologie von Green eMotion wird zwischen dem „Green eMotion EV Services Market“ und einem „Green eMotion Marketplace“ unterschieden, wobei das Konzept vorsieht, dass mehrere Marktplätze im EV Services Markt koexistieren können und die darin von „Service Providern“ zur Verfügung gestellten Dienste über Marktplatzgrenzen hinweg von „Service Requestern“ genutzt werden können. Der Green eMotion Marketplace agiert hierbei als Dienstvermittler für B2B E-Mobilitäts-Dienste.

Es wird zwischen vier verschiedenen Dienstkategorien unterschieden:

- **Core Services**  
Basisdienste, die zur Nutzung aller anderen Dienste zwingend notwendig sind und das Fundament des Green eMotion Marktplatzes darstellen. Beispiele hierfür sind die Registrierung der jeweiligen B2B Geschäftspartner, die Erstellung von Dienstnutzungsverträgen, die Registrierung und Überwachung der Dienste sowie die Abrechnung der Dienstenutzung.
- **Value Added Services**  
B2B-Dienste, welche einen Mehrwert über die Funktionalität der Basisdienste für den Endkunden (Basic End User Services) hinaus bieten, speziell hinsichtlich des E-Mobilitätskontextes, wobei dies keine Einschränkung darstellen soll. Die Abgrenzung zu den Basisdiensten ist nicht immer trennscharf, jedoch könnten unter Mehrwertdiensten bspw. die Reservierung von Ladepunkten, das Lastmanagement sowie ein CO<sub>2</sub>-Berichtswesen verstanden werden.
- **Clearing House Services**  
Diese Art Dienste ermöglichen die Abwicklung von Roamingprozessen von bspw. grenzüberschreitenden Ladevorgängen. Bei Clearing House Services wird zwischen den zwei Kategorien Vertragsabwicklung und Finanztransaktionsabwicklung unterschieden.
- **Basic End User Services**  
Die Basisdienste für Endkunden stellen die minimal nötige Funktionalität für ein verbraucherfreundliches und interoperables E-Mobilitätserlebnis dar. Hierzu zählt u. a. das Auffinden verfügbarer Ladestationen in einem gewissen Umkreis.

---

<sup>8</sup><http://www.greenemotion-project.eu/>

Abbildung 5.5 zeigt eine architektonische Übersicht über die Struktur des Green eMotion EV Service Market. Hierbei ist zu sehen, dass die Service Requester Inanspruchnehmer anderer B2B-Dienste (Value Added Services und Clearing House Services) sind, um ihren Endkunden wiederum Dienste anbieten zu können, die sich ggf. aus der Nutzung fremder Mehrwertdienste ergeben. Service Requester können gegenüber anderen B2B-Akteuren des Marktplatzes auch als Service Provider auftreten.

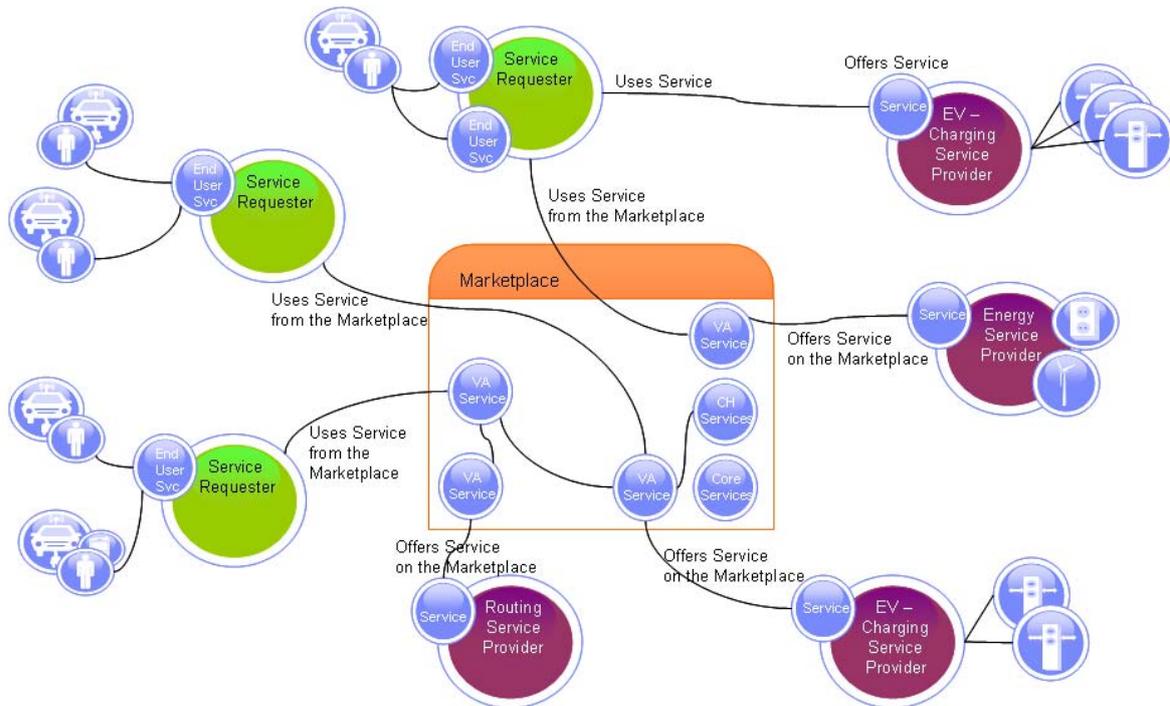


Abbildung 5.5: Architektur des Green eMotion EV Service Market [30]

Wie bereits angesprochen, können mehrere Marktplätze koexistieren, die entweder völlig unabhängig voneinander agieren oder eine Verbundstruktur (hierarchisch, peer-to-peer) eingehen. Die E-Mobilitätsdienste können über einen solchen Marktplatz oder auch über eine direkte bilaterale Vertragsbeziehung zwischen B2B-Diensteanbietern offeriert werden.

Es werden diverse Marktrollen definiert, die ein Marktakteur einnehmen kann, um als Service Provider, Service Requester oder gar beides zu agieren. Hierzu zählen bspw. Stromversorger, Verteilnetzbetreiber, Übertragungsnetzbetreiber, Automobilhersteller, Diensteanbieter für E-Fahrzeugnutzer, Ladeinfrastrukturbetreiber, Mobilitäts-Diensteanbieter und Stadtverwaltung.

Wie zu erkennen ist, ergeben sich hier Parallelitäten zwischen dem Ansatz von Hubject und dem von Green eMotion. Ein Endkunde muss stets nur eine Vertragsbeziehung mit einem der Marktakteure unterhalten, um die Dienste anderer Akteure, wie bspw. das Laden an fremder Ladeinfrastruktur, in Anspruch nehmen zu können. Es ist jedoch auch klar ersichtlich, dass der Rahmen, den Green eMotion sich gesteckt hat, um einiges weiter gefasst ist als der Rahmen des Joint Ventures Hubject, welches sich bisher nur auf die Abrechnungsdienste für das E-Roaming (Clearing House Services) fokussiert.

Abschließend soll mit Abbildung 5.6 deutlich gemacht werden, wie komplex die Referenzarchitektur für die angesprochene B2B-Dienstplattform aufgebaut ist. Die grün eingefärbten

Felder kennzeichnen Elemente der Plattform, welche im Rahmen der Demoregionen realisiert und erprobt werden sollen.

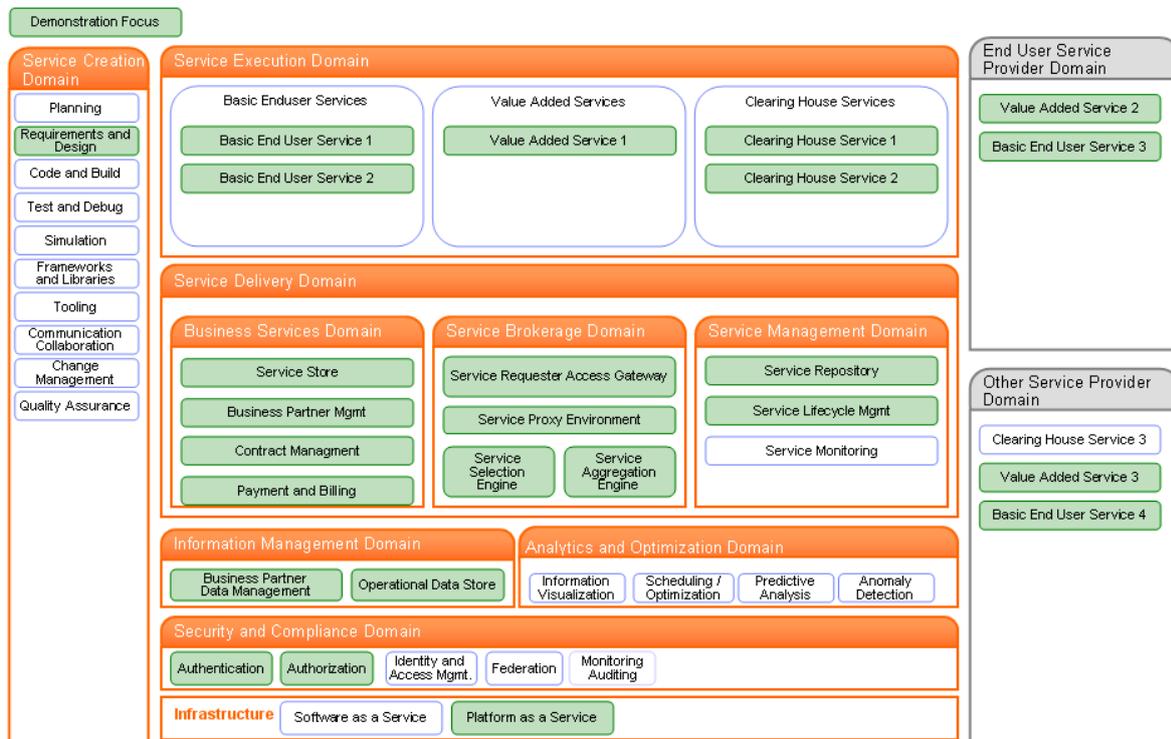


Abbildung 5.6: Referenzarchitektur – Demonstrationsfokus [30]

Bei der Kommunikation mit dem Elektrofahrzeug wird auf den internationalen Standard ISO/IEC 15118 gesetzt, um zum einen das Untersuchungsszenario durch die Nutzung eines genormten Kommunikationsprotokolls so realistisch und zukunftsfähig wie möglich zu gestalten und andererseits die Eignung dieser Norm für das gesteuerte Laden u. a. im Heimbereich aufzuzeigen. Daher wird in Abschnitt 6.1 zuerst eine Bewertung der Zukunftsfähigkeit der ISO/IEC 15118 Norm anhand des zweiten Teils (ISO/IEC 15118-2) vorgenommen, bevor im weiteren Verlauf dieses Kapitels auf die konkreten Ergebnisse eingegangen wird, die durch die Einbindung des Elektrofahrzeugs in das EMS des Smart Home erzielt werden konnten.

## 6.1 Zukunftsfähigkeit der ISO/IEC 15118 Norm

Möchte man einen internationalen Standard bewerten, so bieten sich in erster Linie die folgenden Kriterien an:

- Akzeptanz
- Erweiterbarkeit
- Sicherheit
- Effizienz
- Komplexität

Letzten Endes haben die Bewertungskriterien Komplexität, Erweiterbarkeit, Effizienz und Sicherheit auch eine direkte Auswirkung auf die Akzeptanz, dennoch soll in Abschnitt 6.1.1 die Akzeptanz mehr vor dem Hintergrund der bereits laufenden Aktivitäten in der Automobilindustrie, der Energiewirtschaft und der Ladeinfrastrukturbetreiber verstanden werden.

### 6.1.1 Akzeptanz

Es mag auf den ersten Blick eher in einer vagen Vermutung münden, einen Kommunikationsstandard, welcher erst kürzlich als international gültiger Standard (IS) veröffentlicht wurde

(siehe Tabelle 2.1), hinsichtlich seiner Akzeptanz zu bewerten. Die entsprechenden Marktteilnehmer im Elektromobilitätsmarkt möchten natürlich ihre Investitionskosten möglichst gering halten und fürchten demnach überhöhte Implementierungsausgaben für einen Standard, dessen technische Spezifikation sich auf dem Weg zum IS noch im Wandel befand. Dennoch lassen sich schon jetzt Anzeichen dafür finden, wie breit dieser Standard Unterstützung findet.

Weltweit beginnen Hersteller von Elektroautos und Ladeinfrastruktur sowie diverse Zulieferfirmen, die Anforderungen des Ladestandards umzusetzen und bringen bereits jetzt schon Produkte auf den Markt. Tabelle 6.1 liefert eine Übersicht über Firmen, die bereits erste Produkte, welche die Spezifikationen in ISO/IEC 15118-2 oder -3 umsetzen, verkaufen. Bei Firmen, denen ein konkretes Produkt zugeordnet werden kann, ist das Produkt vermerkt, andernfalls ist ein Hinweis auf das Projekt gegeben, an welchem die Firma beteiligt ist.

Eine Kurzvorstellung der Projekte soll darüber hinaus die Beziehung zum ISO/IEC 15118 Standard verdeutlichen. Das Joint Venture Hubject [35] wurde bereits in Kapitel 5 vorgestellt.

### **openV2G**

Das Open-Source-Projekt openV2G [68] wurde durch die Siemens Corporate Technology und die TU Dortmund ins Leben gerufen und hat zum Ziel, eine freie Referenzimplementierung auf Basis der Programmiersprache C zur Verfügung zu stellen. Die mittlerweile erhältliche Version 0.8 basiert auf dem FDIS-Status der ISO/IEC 15118-2.

### **eNterop**

Das vom BMWi geförderte Projekt eNterop [67] hat sich zum Ziel gesetzt, eine Referenzplattform für automatisierbare Testabläufe in Software und Hardware zu realisieren, um Firmen und Institutionen die Möglichkeiten zu bieten, ihre Implementierung der ISO/IEC 15118-2 und -3 auf Standardkonformität hin zu überprüfen. Somit wird die Interoperabilität diverser Lösungen gefördert, was einen wichtigen Schritt hin zu einer funktionierenden E-Mobilität bedeutet. Hierbei werden die Teile ISO/IEC 15118-4 und -5 zu Grunde gelegt, welche entsprechende Konformitätstests für die Teile 2 und 3 der Norm beschreiben.

### **SecMobil**

Das ebenfalls vom BMWi im Rahmen von IKT für Elektromobilität II geförderte Projekt SecMobil [23] bearbeitet Fragestellungen bzgl. der IT-Sicherheit im Kontext der Elektromobilität. Es werden u. a. diverse Standards, insbesondere Eichvorschriften und BSI-Anforderungen für ein sicheres eMetering sowie die ISO/IEC 15118-2 Norm beachtet und Anregungen für die Weiterentwicklung solcher Standards gegeben.

Vor dem Hintergrund der bereits bestehenden Produktpalette und Forschungsprojekte, die die ISO/IEC 15118 Norm adressieren, und der Tatsache, dass sich gar Teile der Norm noch im Entwicklungsstadium befinden, ist die Bedeutsamkeit und Akzeptanz dieser Spezifikation als vergleichsweise hoch einzustufen. Der Konsens, der zwischen den am Standard arbeitenden drei unterschiedlichen Industriezweigen – Automobilindustrie, Energiewirtschaft und Ladeinfrastrukturhersteller – auf internationaler Ebene mit Beitragenden aus der EU, den USA, Japan, China und Südkorea erreicht werden konnte, unterstreicht diese Aussage.

Darüber hinaus wird im „Technischen Leitfaden Ladeinfrastruktur“ [50], welcher von der Nationalen Plattform Elektromobilität herausgegeben wurde, empfohlen, „bei größeren Installationen [...] zumindest die Möglichkeit einer Nachrüstung der Kommunikationsmöglichkeit nach ISO/IEC 15118“ zu bedenken. Zudem wird darin erwähnt, dass für den in Abschnitt 2.1.1

Tabelle 6.1: Übersicht über bereits bestehende Firmen-Aktivitäten bzgl. ISO/IEC 15118

<b>Firma</b>	<b>Tätigkeitsbereich</b>	<b>Produkt / Projektmitglied</b>
Auronik	Anbieter von Infotainment- und Navigationstechnologie für die Automobilindustrie	Softwarestacks (ECommStack), Testsuites und Steuergeräte [8]
BMW	Automobilhersteller	BMW i3 und BMW i8 (angekündigt), Gesellschafter bei Hsubject, Projektmitglied eNterop
Bosch	Software zur Steuerung der E-Roaming Prozesse über Hsubject-Netzwerk	eMobility Starter Package [12]
Continental AG	Autozulieferer	Projektmitglied eNterop
Daimler	Automobilhersteller	Smart, A-Klasse und E-Klasse (angekündigt), Gesellschafter bei Hsubject, Projektmitglied eNterop und SecMobil, Projekt mit RWE und University of California San Diego [59]
Ebee Smart Technologies GmbH	Technologieanbieter für die Energieversorgungs- und Automobilindustrie	Kompakter Ladepunkt [20]
EnBW	Energieversorger	Gesellschafter bei Hsubject
ESCRYPT GmbH	Embedded Security	Konsortialführer SecMobil
InSys	Industrielle Datenkommunikation	INSYS Powerline GP [38]
KEBA	Ladeinfrastrukturanbieter	KeContact M10 [41]
RWE	Energieversorger und Ladeinfrastrukturanbieter	Projektmitglied eNterop und Gesellschafter bei Hsubject, Projekt mit Daimler und University of California San Diego [59]
Siemens	Elektronik und Energietechnik	Konsortialführer eNterop, Projektmitglied openV2G und Gesellschafter bei Hsubject
SMA	Hersteller von Solar-Wechselrichtern	Projektmitglied INEES
Vector Informatik	Entwicklung von Embedded Electronics	MICROSAR IP und CANoe.IP [71]
VW	Automobilhersteller	Projektmitglied eNterop

eingeführten Ladestandard Combined Charging System die Kommunikation über ISO/IEC 15118 zwingend erforderlich ist.

### 6.1.2 Erweiterbarkeit

Das in Abbildung 2.9 abgebildete Vehicle-to-grid Transfer Protocol (V2GTP), angesiedelt auf der Sitzungsschicht, ist ein innerhalb der ISO/IEC 151182-Spezifikation definiertes Kommunikationsprotokoll basierend auf TCP/TLS zwischen zwei sogenannten „V2GTP entities“, also dem EVCC und dem SECC. Die Protokolldefinition schreibt einen aus 8 Byte bestehenden Header und einen Payload mit einer maximalen Größe von 4 GB vor, wie Abbildung 6.1 zu entnehmen ist. Die Protokollversion, auf die sich beide Kommunikationspartner mittels der

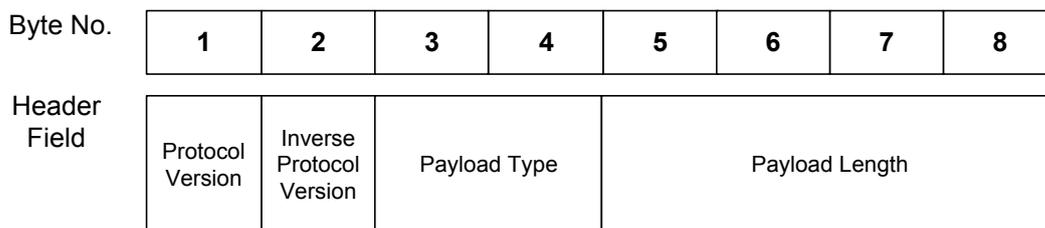


Abbildung 6.1: Header-Struktur einer V2GTP-Nachricht [39]

supportedAppProtocol1-Nachricht (siehe Abschnitt 2.2.1, Seite 33) geeinigt haben, wird im ersten Byte übertragen, gefolgt von ihrer bitweisen Inversen, die für eine Verifikation genutzt wird. Die mit zwei Bytes Länge im Standard definierten Payloadtypen sind in Tabelle 6.2 aufgelistet. Mit den letzten beiden Bytes des Headers wird über die eigentliche Länge der Nachricht informiert. Eine Payloadlänge von bis zu 4 GB erscheint angesichts des Einsatzzwecks in eingebetteten Systemen wie dem Elektrofahrzeug, wo die Speichergröße aufgrund der Skaleneffekte beim Automobilbau einen wichtigen Kostenfaktor darstellt und meist gering gehalten wird, als zu groß und wird sehr wahrscheinlich nie ausgenutzt werden. Vielmehr wurde sich hierbei am Standard ISO 13400<sup>1</sup> orientiert, welcher bereits im Automobilbereich zum Einsatz kommt. Die aktuelle Spezifikation [39] erlaubt das Senden einer Nachricht mit

Tabelle 6.2: Übersicht über die in einer V2GTP-Nachricht erlaubten Payloadtypen (nach [39])

Payloadtyp Wert	Payloadtyp Name
0x000 – 0x8000	Reserviert
0x8001	EXI-kodierte V2G-Nachricht
0x8002 – 0x8FFF	Reserviert
0x9000	SDP Request-Nachricht
0x9001	SDP Response-Nachricht
0x9002 – 0x9FFF	Reserviert
0xA000 – 0xFFFF	Herstellerspezifische Nutzung

einem dem EVCC oder SECC unbekanntem Payloadtyp, ohne dass die Kommunikationssession daraufhin abgebrochen wird. Als Folge wird die Nachricht mit dem der jeweiligen Gegenseite unbekanntem Payloadtyp einfach ignoriert.

<sup>1</sup>“Road vehicles - Diagnostic communication over Internet Protocol (DoIP) – Part 2: Transport protocol and network layer services”, [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=53766](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=53766)

Wie in Abschnitt 4.2, Seite 57 bereits erklärt, wurden die Nachrichten `ChargeParameterDiscoveryReq` und `ChargingStatusReq` um gewisse Parameter erweitert, die u. a. für Informationen bzgl. der Rückspeisung von Energie eingeführt wurden. Nun gibt es generell zwei Möglichkeiten, eine solche Parametererweiterung der Nachrichten durchzuführen und dennoch eine standardkonforme Implementierung zu gewährleisten, wie in den nächsten beiden Absätzen erläutert wird.

### Direkte Änderung der Nachrichtendefinition

Das EXI-Format verfolgt den Ansatz, Schemainformationen aus einem XML-Schema in eine EXI-Grammatik zu transformieren, da diese EXI-Grammatik um einiges leichter zu prozessieren ist als die Schemainformation einer XSD-Datei und somit einen Geschwindigkeitsvorsprung mit sich bringt. Ein EXI-Bytestrom wird unter der Verwendung desselben XML-Schemas sowohl erzeugt wie auch wieder dekodiert. Ist nun ein Element einer zu übermittelnden Nachricht wie bspw. der Parameter `eAmountDischarge` für die rückspeisefähige Energiemenge nicht im der Nachricht zugeordneten XML-Schema definiert und mit einem sogenannten Namespace versehen, so ist dieser Parameter als Schemaabweichung nach [73] zu kodieren [39]. Hierbei werden unbekannte einfache Datentypen evtl. datentypkonform auch wieder kodiert, wohingegen komplexere unbekannte Datentypen im Klartext übertragen werden. Für diese Schemaabweichung wird eine Ausnahmebehandlung im entsprechenden EXI Codec benötigt, was wiederum die Implementierung des Codecs aufwändiger macht.

### Separates Schema und neuer Payloadtyp

Üblicherweise wird jeder EXI-kodierten Nachricht im V2GTP-Header gemäß Tabelle 6.2 der Payloadtyp mit dem Wert `0x8001` zugewiesen. Will man aber eine Parametererweiterung der Nachrichten vornehmen, ohne das entsprechende XML-Schema ebenfalls anzupassen – was eine Inkompatibilität zum offiziellen Standard und somit zu standardkonformen Implementierungen anderer Hersteller mit sich bringen würde – oder eine Schemaabweichung in Kauf zu nehmen, so gibt es die Möglichkeit, einfach zusätzlich einen weiteren Payloadtyp, bspw. mit dem Wert `0xA000`, zu verwenden. Hierbei sind jedoch folgende Schritte zu beachten, die am Beispiel einer erweiterten `ChargeParameterDiscoveryReq`-Nachricht verdeutlicht werden:

1. Es muss ein separates Nachrichtenobjekt erstellt werden, welches bspw. `ChargeParameterDiscoveryReqExtension` heißen könnte. Für diese Nachricht muss man sich nun für eine der beiden folgenden Optionen entscheiden:
  - a) Man erstellt ebenfalls ein separates XML-Schema, gegen das die Nachricht validiert werden kann, um sie wiederum im EXI-Format kodieren zu können.
  - b) Man wählt eine beliebige Datenkodierung, welche generisch von der Applikation geparkt werden kann, wie bspw. das sehr flexible JSON-Format<sup>2</sup>.

Hierbei ist es wichtig, dass die entsprechend gewählte Kodierung einer Kennung zugeordnet ist, die beiden Seiten (EVCC und SECC) bekannt ist. Dies kann bspw. mit einem speziellen Payloadtyp verknüpft werden. So könnte man eine separate EXI-Kodierung mit dem Payloadtyp `0xA000` und eine JSON-Kodierung mit dem Payloadtyp `0xA001` versehen.

2. Im Zustandsautomaten des SECC muss ein weiterer Zustand implementiert sein, welcher

<sup>2</sup>JSON steht für JavaScript Object Notation und ist ein ebenfalls kompaktes Datenformat in für Mensch und Maschine einfach lesbarer Textform.

den Inhalt dieser zusätzlichen Nachricht entweder direkt vor oder direkt nach dem Empfang einer `ChargeParameterDiscoveryReq`-Nachricht verarbeiten kann.

3. Da Nachrichten mit unbekanntem Payloadtypen laut der ISO/IEC 15118-2-Spezifikation einfach ignoriert werden, muss lediglich auf Fahrzeugseite, also auf Seiten des EVCC, darauf geachtet werden, dass innerhalb von  $60\text{s}^3$  die Nachricht mit dem passenden Payloadtyp gesendet wird, falls zum neuen Payloadtyp (z. B. `0xA000`) keine Response-Nachricht erfolgte.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der erste Ansatz gewählt (Direkte Änderung der Nachrichtendefinition), da dieser weniger Implementierungsaufwand bedeutete und der verwendete EXI Codec<sup>4</sup> [55] diese Schemaabweichung bereits unterstützt.

Ein weiterer Aspekt der Erweiterbarkeit dieses Standards betrifft die Auswahl von Mehrwertdienstleistungen. Im Rahmen der `ServiceDiscoveryReq/-Res` sowie `ServiceDetailReq/-Res` Nachrichten können Informationen zwischen EVCC und SECC ausgetauscht werden, welche die Nutzung von diversen Diensten ermöglichen. Tabelle 6.3 listet die bereits in der Spezifikation beschriebenen, für den Ladeprozess relevanten Dienste samt ID, Name und Kategorie auf.

Tabelle 6.3: Definition von ID, Kategorie und Name eines Dienstes (nach [39])

ServiceID	ServiceName	ServiceCategory	Beschreibung
0			Reserviert durch ISO/IEC
1	AC_DC_Charging	EV Charging	Alle Dienstleistungen bezogen auf das Gleich- bzw. Wechselstromladen
2	Certificate	ContractCertificate	Dienst zum Installieren/Aktualisieren eines Vertragszertifikats
3	InternetAccess	Internet	Dienst zur Nutzung von Standardprotokollen wie HTTP, HTTPS, FTP, etc.
4	UseCaseInformation	EVSEInformation	Dienst zum Austausch von Informationen über die Ladestation mit Bezug zu einem Anwendungsfall
5 – 60000			Reserviert durch ISO/IEC
60001 – 60535			Reserviert für implementierungsspezifische Anwendung

Hierzu zählen die diversen Ladedienste an sich (ein-/dreiphasiges AC-Laden oder DC-Laden), ein Installations- bzw. Aktualisierungsdienst für Vertragszertifikate sowie ein Dienst für die Nutzung der Standardprotokolle FTP, HTTP oder HTTPS. Man könnte sich vorstellen, dass

<sup>3</sup>Abschnitt 2.2.1 ging bereits darauf ein, dass nie mehr als 60 Sekunden zwischen zwei aufeinander folgenden Anfragen vergehen dürfen, weil ansonsten ein Timeout, welcher die Kommunikationssession beendet, ausgelöst wird.

<sup>4</sup>Dieser EXI-Codec ist unter der GNU General Public License version 2 verfügbar und somit in nicht-kommerziellen Projekten einsetzbar.

über den Dienst mit der ServiceID 3 Metadaten über ein Streamingportal zu Entertainment-Zwecken während eines Ladevorgangs übertragen werden oder auch ein Softwareupdate für den EVCC. Für sämtliche Dienste, die jetzt noch nicht ersichtlich sein mögen und nicht von der ISO oder IEC standardisiert werden müssen, steht eine Bandbreite von 5535 ServiceIDs zur Verfügung. Somit wird eine gewisse Zukunftssicherheit und Flexibilität gewährt, sofern E-Fahrzeughersteller und Ladeinfrastrukturbetreiber sich auf eine gemeinsame Definition von Diensten einigen können, die sie in ihre jeweiligen Implementierungen integrieren.

### 6.1.3 Sicherheit

Sämtliche Aspekte, die funktionale Sicherheitsrisiken durch Überspannung oder Überstrom betreffen, müssen durch die korrekte Implementierung des bereits in Abschnitt 2.1.2 vorgestellten Standards IEC 61851 abgedeckt werden. Im Rahmen der IT-Sicherheit hingegen müssen für die Kommunikation über das ISO/IEC 15118-2 Protokoll und die übermittelten Daten folgende drei Aspekte erfüllt sein:

- **Vertraulichkeit:** Der Inhalt einer Nachricht darf nur vom vorgesehenen Empfängerkreis gelesen werden dürfen, jedoch nicht von unauthorisierten Dritten.
- **Integrität:** Eine unautorisierte Modifikation des gesendeten Nachrichteninhalts muss verhindert bzw. zumindest erkannt werden.
- **Authentizität:** Es muss festgestellt werden können, ob die kommunizierenden Partner auch wirklich diejenigen sind, die sie behaupten zu sein. Auch muss die Echtheit der übertragenen Nachrichten festgestellt werden können.

Die ISO/IEC 15118-2 Spezifikation unterstützt Authentizität und Integrität durch die Erstellung und Überprüfung von XML-basierten Signaturen. Vertraulichkeit wird durch Ver- und Entschlüsselung mittels asymmetrischer Kryptographie sichergestellt. Diese Sicherheitsmechanismen werden auf unterschiedlichen Schichten durchgeführt, welche im Folgenden nun detailliert beleuchtet werden.

#### Sicherheit auf der Transportschicht

Auf der Transportschicht des ISO/OSI-Schichtenmodells steht das TLS-Protokoll (Transport Layer Security) zur Verfügung (vgl. Abbildung 2.9), welches ein Verschlüsselungsprotokoll zur sicheren Datenübertragung im Internet darstellt. Neben dem ebenfalls auf Schicht vier befindlichen Protokoll TCP (Transmission Control Protocol) gehört TLS auch zu der Familie der zustandsbehafteten und zuverlässigen Übertragungsprotokolle. Die Nutzung von TLS für sämtliche Kommunikationsabläufe zwischen dem Ladesteuergerät im Elektrofahrzeug (EVCC) und dem in der Ladestation (SECC) ist jedoch nicht in jedem Fall zwingend erforderlich, wie Abbildung 6.2 entnommen werden kann.

Der ISO/IEC 15118 Standard definiert vier sogenannte „Message Sets“, welche sich anhand der in Abschnitt 2.2.1, Seite 32 bereits vorgestellten Identifizierungsmodi EIM und Plug-and-Charge (hier: PnC) sowie der Ladevarianten AC- und DC-Laden unterscheiden lassen:

- AC-Laden im EIM-Modus
- DC-Laden im EIM-Modus
- AC-Laden im PnC-Modus

Allowed Message Sets <sup>a</sup>	Other Environment (not trusted)				Trusted Environment <sup>c</sup>			
	DC EIM	AC EIM	DC EIM, VAS	AC EIM, VAS	DC EIM	AC EIM	DC EIM, VAS	AC EIM, VAS
EVCC TLS support	optional	optional	mandatory	mandatory	optional	optional	mandatory	mandatory
SECC TLS support	mandatory	mandatory	mandatory	mandatory	optional	optional	mandatory	mandatory
TLS usage negotiation using SDP <sup>b</sup>	EV decides, EVSE shall accept EV's decision	EV decides, EVSE shall accept EV's decision	EV shall use TLS, EVSE shall reject, if EV uses no TLS	EV shall use TLS, EVSE shall reject, if EV uses no TLS	refer to Table 4	refer to Table 4	EV shall use TLS, EVSE shall reject, if EV uses no TLS	EV shall use TLS, EVSE shall reject, if EV uses no TLS
<sup>a</sup> This refers to messages as defined in this standard. In case of VAS, of course any other connections (which are not part of this standard) are possible <sup>b</sup> Rejecting means to stop communication <sup>c</sup> See Section 3 for a definition								

Abbildung 6.2: Vorgaben für TLS-Unterstützung durch EVCC und SECC [39]

- DC-Laden im PnC-Modus

Je nach Art der Identifizierung des Elektromobilisten (EIM z. B. mittels RFID-Karte, PnC = vertragsbasierte Authentifizierung und Autorisierung) und der Ladeart sind also teils unterschiedliche Nachrichten anzuwenden, welche in der vorliegenden Tabelle unterschieden werden. VAS steht für angebotene Mehrwertdienste.

Im Falle des PnC-Identifizierungsmodus stellt eine TLS-Verschlüsselung die notwendige Voraussetzung dar. Im EIM-Fall hingegen werden ein paar Ausnahmen erlaubt. Hiernach muss eine Ladestation nur dann TLS unterstützen, wenn sie sich nicht in einer vertrauenswürdigen Umgebung befindet. Für das Fahrzeug ist diese Vorgabe zusätzlich nur auf die Nutzung von Mehrwertdiensten beschränkt. In der vertrauenswürdigen Umgebung ist selbst im Falle, dass keine Mehrwertdienste genutzt werden, ladestationsseitig die Verwendung von TLS optional. Eine vertrauenswürdige Umgebung wird in der Spezifikation folgendermaßen definiert:

„Closed user group (e.g. members of car sharing system) with some pre-distributed token for access to the SECC charging service (e.g. key to home garage, RFID token for car sharing), which is something where a person or instance is responsible for, for example (not limited to) a person with its home garage, a car sharing operator or a taxi operator.“

Es ist anzunehmen, dass aufgrund des höheren Implementierungsaufwands für eine TLS-Verschlüsselung und der damit einhergehenden Kosten diese Ausnahmen eingeführt wurden, was jedoch eine Sicherheitslücke darstellt, die niemals hätte genormt werden dürfen.

Im Falle des Einsatzes von TLS kommen, wie in Kapitel 5 bereits eingeführt, SECC-Zertifikate zum Einsatz, um die Ladestation gegenüber dem E-Fahrzeug zu authentifizieren. Für die Authentifikation des Fahrzeugs gegenüber der Ladestation bzw. einer dahinter liegenden Instanz werden hingegen auf Applikationsebene die Vertragszertifikate eingesetzt.

Es wird in der Norm vorgeschrieben, dass X.509v3 Zertifikate nach IETF RFC 5280<sup>5</sup> eingesetzt werden müssen, da hierüber Erweiterungen bzgl. sogenannter Elliptic Curve-Parameter genutzt werden können. Auf die Verwendung von elliptischen Kurven in den eingesetzten kryptographischen Verfahren wird im folgenden Absatz eingegangen.

<sup>5</sup><http://www.ietf.org/rfc/rfc5280.txt>

### Sicherheit auf der Applikationsschicht

Sämtliche spezifizierte Nachrichten sind über XML-Schemata definiert und werden entsprechend beim Nachrichtenaustausch zunächst in XML-Dateien serialisiert und durch einen EXI-Decoder in ein binäres XML-Format konvertiert, bevor sie gesendet werden. Entsprechend werden auf der Applikationsschicht für spezifische Nachrichten XML-Signaturen angewandt, um die Authentizität der ausgetauschten Nachrichten sicherzustellen. So werden bspw. der in der `ChargeParameterDiscoveryRes`-Nachricht enthaltene Parameter `SalesTariff`, welcher die optionalen Preisinformationen sowie die Lastgrenze (vgl. `SalesTariff` und `PMaxSchedule` in Abschnitt 2.2.1, Seite 36) beinhaltet, sowie auch ganze Nachrichten wie `AuthorizationReq` und `MeteringReceiptReq` signiert. Eine vollständige Liste aller signierten Parameter und Nachrichten ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

XML Message	protected fields	signing entity (sender)	verifying entity (receiver)
AuthorizationReq	message body / all fields (if GenChallenge present)	EVCC	SECC
CertificateUpdateReq	message body / all fields	EVCC; signed with Contract Certificate, chain transmitted in message body element	secondary actor
CertificateUpdateRes	ContractSignatureCertChain ContractSignatureEncryptedPrivateKey DHpublickey eMAID	secondary actor: Certificate Provisioning Service	EVCC; certificate chain stored after successful verification
CertificateInstallationReq	message body / all fields	EVCC; signed with OEM Provision Certificate, transmitted in message body element	secondary actor
CertificateInstallationRes	ContractSignatureCertChain ContractSignatureEncryptedPrivateKey DHpublickey ContractID	secondary actor: Certificate Provisioning Service	EVCC; certificate chain stored after successful verification
MeteringReceiptReq	message body / all fields (optionally)	EVCC	SECC
ChargeParameterDiscoveryRes	SalesTariff (optional, required for PnC)	secondary actor: Mobility Operator Sub-CA 2	EVCC

Abbildung 6.3: Übersicht aller XML-basierten Signaturen [39]

Diese Signaturen sind vor allem dann sinnvoll, wenn die Authentizität und Integrität gewisser Daten über den über TLS abgesicherten Kommunikationskanal hinaus gewährleistet werden muss, wie es bei der Kommunikation zwischen einer Ladestation und einer dritten Instanz dahinter der Fall ist, sei es der Ladestromanbieter oder ein Energiemanagementsystem.

Für die Signatur kommen mehrere Richtlinien zum Einsatz:

1. Verwendung des Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA)
2. Hash-Operationen mittels SHA-256 (Hashwert hat eine Bitlänge von 256 Bit) nach NIST FIPS PUB 180-4

### 3. Schlüssellänge für ECC-basierte asymmetrische Kryptographie von 256 Bit

Der Vorteil der Verwendung von elliptischen Kurven bei der Erstellung von Signaturen soll anhand des Schlüsselaustauschverfahrens erläutert werden.

Dieselben elliptischen Kurven, welche für ECDSA zum Einsatz kommen, finden auch in der Variante des Diffie-Hellman Schlüsselaustauschs statt, welche für ISO/IEC 15118-2 spezifiziert wurde. Das Diffie-Hellman Protokoll (DH-Protokoll) zum Schlüsselaustausch beschreibt ein Verfahren, mittels welchem zwei kommunizierende Entitäten ein gemeinsames Geheimnis über einen unsicheren Kanal durch Anwendung asymmetrischer Kryptographie austauschen können. Durch die Information, die beide Entitäten ausgetauscht haben, kann letzten Endes ein Sitzungsschlüssel abgeleitet werden, mit Hilfe dessen die Verschlüsselung von weiteren Informationen durch symmetrische Verfahren wie AES (Advanced Encryption Standard) erfolgen kann. Weitere Informationen zum DH-Verfahren können [11] entnommen werden.

Das Schlüsselaustauschverfahren ist im Rahmen einer Ladekommunikation für die Installation sowie die Aktualisierung von Vertragszertifikaten nötig. Um die Anzahl der auszutauschenden Nachrichten und somit auch Rechenzeit zu reduzieren, kommt im Rahmen der ISO/IEC 15118-2 Spezifikation eine Variante des DH-Verfahrens zum Einsatz: das Elliptic Curve Diffie-Hellman (ECDH). In diesem Verfahren, dessen grundlegende Funktionsweise in Abbildung 6.4 visualisiert ist, wird mit einem kurzlebigen und einem statischen („ephemeral-static“) öffentlichen Schlüssel gearbeitet. Hierbei bleibt der öffentliche Schlüssel  $Q_V$  des Empfängers (EVCC) stets unverändert, also statisch, und ist dem Sender (SA, steht für Secondary Actor, bspw. E-Mobilitätsanbieter) stets bekannt. Im Falle der erstmaligen Installation eines Vertragszertifikats (`CertificateInstallationRes`) entspricht der öffentliche Schlüssel  $Q_V$  dem öffentlichen Schlüssel im OEM Provisioning-Zertifikat (vgl. Kapitel 5). Im Falle der Aktualisierung eines nicht mehr gültigen Vertragszertifikats (`CertificateUpdateRes`) entspricht der öffentliche Schlüssel  $Q_V$  dem des bereits existierenden Vertragszertifikats.

Der Sender jedoch kreiert einen kurzlebigen öffentlichen Schlüssel, in Abbildung 6.4 mit  $Q_{e,U}$  bezeichnet, und sendet diesen über die Ladestation an den EVCC. Beide Parteien müssen sich zu Beginn noch auf ein sogenanntes Generatorpolynom  $G$  einigen, mit Hilfe dessen beide die Berechnung des gemeinsamen geheimen Sitzungsschlüssels  $Z$  durchführen können. Mit Hilfe von  $Z$  kann dann folglich der private Schlüssel des zu installierenden Vertragszertifikats verschlüsselt übertragen und vom EVCC wieder entschlüsselt werden, ohne dass eine Antwortnachricht vom EVCC an den SA vonnöten wäre. Der öffentliche Schlüssel  $Q_V$  des EVCC ist im Vorfeld mittels einer algebraischen Operation auf den beiden Parametern  $G$  und  $d_V$  errechnet worden. Der private Schlüssel  $d_V$  des OEM-Provisioning-Zertifikats ist jedoch nur dem EVCC bekannt.

Das ECDH-Verfahren wäre nicht mehr sicher, wenn ein Angreifer sich zwischen die beiden Kommunikationspartner schalten und Nachrichten verändern könnte, ohne dass dies bemerkt würde. Zu diesem Zweck werden die während des ECDH-Verfahrens ausgetauschten Parameter mittels des ECDSA-Verfahrens zusätzlich digital signiert, wobei dieselben statischen Schlüsselpaare  $(d_V, Q_V)$  (privater Schlüssel, öffentlicher Schlüssel) Verwendung finden.

Eine Datenverschlüsselung (nicht Kommunikationskanalverschlüsselung mittels TLS) im Zuge einer Ladekommunikation über ISO/IEC 15118 findet nur für den bereits erwähnten privaten Schlüssel des Vertragszertifikats statt. Dieser mit `ContractSignatureEncryptedPrivateKey` bezeichnete Parameter wird über die Nachrichten `CertificateInstallationRes` und `CertificateUpdateRes` mittels einer AES 128 Bit Verschlüsselung im CBC (Cipher Block

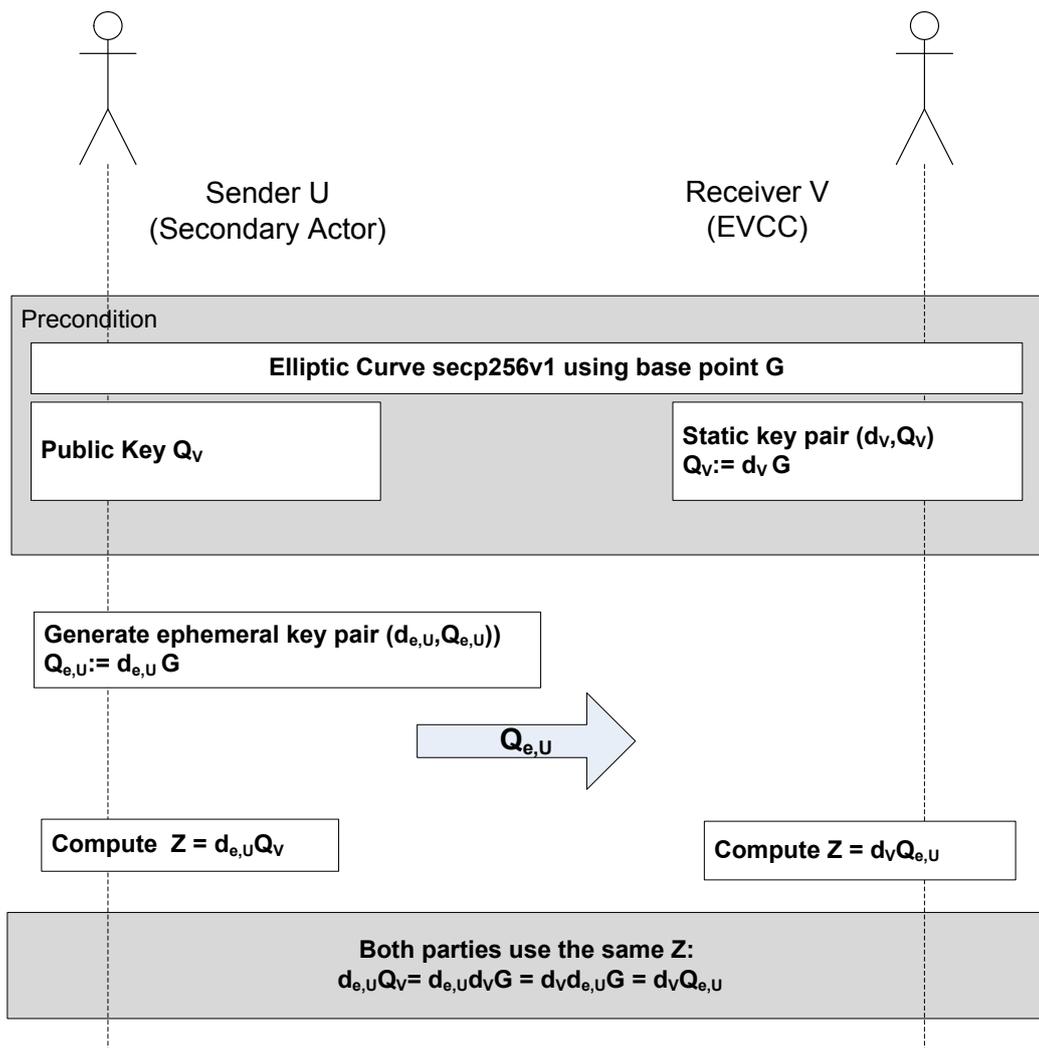


Abbildung 6.4: ECDH-Schlüsselaustausch mit kurzlebigen und statischem öffentlichem Schlüssel [39]

Chaining) Mode übertragen<sup>6</sup>. Der Initialisierungsvektor IV soll hierbei zufällig generiert werden, ebenfalls eine Länge von 128 Bit haben und niemals wiederverwendet werden.

Die Gestalt der zu verwendenden elliptischen Kurve wird in Abbildung 6.4 mit „secp256v2“ bezeichnet, wobei hier eine Schlüssellänge von 256 Bit vorgeschrieben wird. Die Verwendung von elliptischen Kurven im Schlüsselaustausch bzw. in der Signatur hat den charmanten Vorteil, dass darauf basierende Verfahren mit erheblich kürzeren Schlüsseln bei vergleichbarer Sicherheit auskommen [49] [21]. Die Sicherheit des Diffie-Hellman-Verfahrens beruht auf der Schwierigkeit, den diskreten Logarithmus in endlichen Körpern zu berechnen. Dieses Problem, sowie die Faktorisierung ganzer Zahlen, gestaltet sich in elliptischen Kurven nochmals deutlich schwieriger. Daher können bei gleichem Sicherheitsniveau kürzere Schlüssellängen

<sup>6</sup>Dies erfolgt gemäß NIST Special Publication 800-38A: <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-38a/sp800-38a.pdf>.

verwendet werden und auf elliptischen Kurven basierende Kryptosysteme sogar deutlich schneller sein als bisher bekannte Verfahren wie bspw. RSA. Jedoch kommt es in punkto Schnelligkeit und Sicherheit des Verfahrens auch stets auf die konkrete Implementierung der Spezifikation an. Tabelle 6.4 stellt die benötigten Schlüssellängen in Bits für die asymmetrischen Kryptoverfahren RSA und DH der benötigten Schlüssellänge für ECDH gegenüber. Die Tabelle ist so zu interpretieren, dass ausgehend von der Länge eines Sitzungsschlüssels für ein symmetrisches Kryptoverfahren, wie bspw. AES, die Schlüssellänge für RSA bzw. DH, über welche der Sitzungsschlüssel sicher kommuniziert werden muss, vorgeschrieben wird. Das amerikanische National Institute of Standards and Technology (NIST) hat hierbei im Vergleich zur europäischen Vereinigung ECRYPT, dem European Network of Excellence in Cryptology, leicht abweichende Empfehlungen. Man sieht deutlich, dass die symmetrischen Schlüssellängen die benötigten Schlüssellängen für RSA und DH in einem viel schnelleren Maß ansteigen lassen als diejenigen für ECDH. Somit bieten EC-basierte Kryptosysteme eine höhere Sicherheit pro ansteigender symmetrischer Schlüssellänge als RSA oder DH. Elliptische Kurven eignen sich daher besonders gut für den Einsatz im Kommunikationsprotokoll ISO/IEC 15118, welches auf eingebetteten Systemen mit beschränkter Rechenkapazität und Speicherplatz zum Einsatz kommt.

Tabelle 6.4: Vergleich der Verschlüsselungsstärken basierend auf diversen Sicherheitsniveaus [49] [21]

Symmetrisch	RSA und DH (NIST)	RSA und DH (ECRYPT)	ECDH
80	1024	1248	160
112	2048	2432	224
128	3072	3248	256
192	7680	7936	384
256	15360	15424	512

Die hier vorgestellten Verfahren bieten eine solide Grundlage, auf Basis derer eine sichere Ladekommunikation zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation sowie dahinter liegender dritter Systeme möglich ist. Wie bereits erwähnt, wurde jedoch mit der optionalen Verwendung von TLS eine unnötige Sicherheitslücke eingeführt, die dazu führen kann, dass ein Angreifer in einer sogenannten vertrauenswürdigen Umgebung nach obiger Definition bspw. die Lastbegrenzungskurve (`PMaxSchedule`), die vom SECC an den EVCC gesendet wird, manipulieren und mit seiner eigenen Signatur versehen könnte. Der EVCC kann die Authentizität des Senders aufgrund fehlender Zertifikate dann nicht überprüfen. Es ist somit leicht ein Szenario denkbar, in welchem sämtliche E-Fahrzeuge eines betrieblichen Fuhrparks – was ebenso als „car sharing operator“ verstanden werden kann – eine Überlastsituation herbeiführen, die zu erheblichen Kosten und auch Stromausfällen führen kann.

Des Weiteren ist zu beachten, dass das ECDH keine sogenannte „perfect forward secrecy“ garantiert. Hierunter ist in der Kryptographie folgende Eigenschaft von Schlüsselaustauschverfahren (wie dem DH oder ECDH) zu verstehen: Bei einem Verlust bzw. dem Aufdecken des privaten (statischen) Schlüssels können der ausgehandelte Sitzungsschlüssel und somit alle zukünftigen sowie vergangenen Kommunikationen nicht aufgedeckt werden. Im Falle des ECDH könnte somit nicht nur die Kommunikation zwischen Secondary Actor und EVCC entschlüsselt werden. Vielmehr könnten auch die Zählerdaten, welche vom EVCC optional signiert und für Abrechnungsprozesse in manchen Ländern verwendet werden, manipuliert und diese

manipulierten Daten mit der korrekten Signatur des gestohlenen privaten Schlüssels versehen werden. Da der private Schlüssel des Vertragszertifikats auf Seiten des E-Mobilitätsanbieters generiert wurde, bestehen somit sogar zwei Angriffspunkte, um diesen Schlüssel zu stehlen, sofern der private Schlüssel nach Generierung auch lokal gespeichert wurde.

Zu guter Letzt ist ein implementiertes kryptographisches Verfahren immer nur so sicher, wie sich bei der Implementierung korrekt an die offizielle Spezifikation gehalten wurde.

#### 6.1.4 Effizienz

Eine Beurteilung der Effizienz des Protokolls lässt sich anhand der Kriterien

- effiziente Verarbeitung der Nachrichten und
- Nachrichtengröße und Speicherbedarf

durchführen. Durch die Verwendung des Efficient XML Interchange (EXI) Formats für die binäre Repräsentation von XML-basierten Nachrichten und die Verarbeitung der EXI-Grammatik statt der Schemainformation einer XSD-Datei im Kommunikationscontroller kann ein erheblicher Geschwindigkeitsvorsprung erreicht werden. Schmutzler et al. [61] haben eine frühe Version des ISO/IEC 15118 Standards hinsichtlich der Kodierungseffizienz des EXI-Formats in diversen Modi quantitativ untersucht. Hierbei wurde die auch im Rahmen dieser Arbeit verwendete EXIefficient-Bibliothek [55] genutzt. Das Einsparungspotential der EXI-kodierten Nachrichten im Vergleich zur Nachrichtengröße von XML-Nachrichten kann Abbildung 6.5 entnommen werden.

Message Pattern	XML schema informed	EXI schema informed	EXI strict byte pkd	EXI strict bit pkd	Compr. Factor	Compr. Rate
SessionSetupReq	637	69	72	67	9,5	10,52%
ServiceDiscoveryReq	781	278	281	276	2,8	35,34%
S&PSelectionReq	813	64	68	60	13,6	7,38%
PaymentDetailsReq	556	46	52	44	12,6	7,91%
PowerDiscoveryReq	1127	61	69	53	21,3	4,70%
LineLockReq	643	34	37	31	20,7	4,82%
PowerDeliveryReq	1172	50	58	43	27,3	3,67%
MeteringStatusReq	490	32	34	30	16,3	6,12%
MeteringReceiptReq	1025	114	123	108	9,5	10,54%
Arithmetic Mean	805	83	88	79	10,2	10,11%
Max	1172	278	281	276	2,8	35,34%
Min	490	32	34	30	2,8	3,67%

a)

Message Pattern	XML schema informed	EXI schema informed	EXI strict byte pkd	EXI strict bit pkd	Compr. Factor	Compr. Rate
SessionSetupRes	792	42	52	37	21,4	4,67%
ServiceDiscoveryRes	1013	83	89	77	13,2	7,60%
S&PSelectionRes	563	33	35	31	18,2	5,51%
PaymentDetailsRes	545	33	35	31	17,6	5,69%
PowerDiscoveryRes	2773	138	166	115	24,1	4,15%
LineLockRes	778	37	41	32	24,3	4,11%
PowerDeliveryRes	543	33	35	31	17,5	5,71%
MeteringStatusRes	1338	94	114	84	15,9	6,28%
MeteringReceiptRes	547	33	35	31	17,6	5,67%
Arithmetic Mean	988	58	67	52	19,0	5,49%
Max	2773	138	166	115	24,3	7,60%
Min	543	33	35	31	13,2	4,11%

b)

Abbildung 6.5: Quantitative Übersicht über ISO/IEC 15118 Nachrichtengrößen in XML und diversen EXI-Modi [61]

Die Größen der jeweiligen Request- (Tabelle a) und Responenachrichten (Tabelle b) wurden durch die Instanziierung jeder Nachricht mit allen optionalen Parametern und Attributen sowie der Verwendung maximal möglicher Werte für jedes Element bestimmt. Dieser worst-case-Test ist relevant für die Bestimmung minimal nötiger Puffergrößen der In- und Output-Puffer der eingebetteten Kommunikationscontroller. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die mittlere Kompressionsrate der EXI-Kodierung bei den Request-Nachrichten bei 10 % liegt, die Response-Nachrichten weisen gar eine noch bessere mittlere Kompressionsrate von 5,5 % auf. Der Grund für diese unterschiedlichen Kompressionsraten liegt in der Entropie der XML-Datenstruktur begründet, welche dem EXI-Encoder übergeben wird. Je geringer die Entropie, desto besser die Kompression, was bspw. anhand Tabelle a deutlich wird. Die darin gelistete Nachricht `ServiceDiscoveryReq` ist für diesen Ausreißer maßgeblich verantwortlich. Dies

rührt daher, dass in dieser Nachricht ein String-Parameter enthalten ist, welcher den Umfang der angefragten Ladedienste begrenzen kann und bis zu 256 Zeichen enthalten kann. Dieser Zeichenkettenparameter ist für die hohe Entropie verantwortlich. Im Vergleich dazu fällt die Größe der `PowerDiscoveryRes` Nachricht<sup>7</sup> mit 2773 Bytes im XML-Format um einiges größer aus, was u. a. auf die vielen tief verschachtelten Parameter (vgl. Tabelle 4.6 als Ausschnitt des `SalesTariff` Parameters) zurückzuführen ist. Dennoch ist die Entropie um einiges geringer, was in einer sehr guten Kompressionsrate von 4,15 % resultiert.

Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass kryptographische Verfahren eingesetzt werden, die mit relativ kurzen Schlüssellängen in asymmetrischen Kryptoverfahren bei vergleichsweise hohen Sicherheitsniveaus auskommen, wie in Abschnitt 6.1.3 gezeigt wurde. Dies kann ebenfalls Geschwindigkeitsvorsprünge im Vergleich zu bspw. RSA mit sich bringen. Letzten Endes wurde für die Größe eines zu speichernden Zertifikats die Vorgabe eingeführt, dass 800 Bytes nicht überschritten werden dürfen, was z. B. dadurch erreicht werden kann, dass irrelevante Informationen wie die Adresse des Zertifikatsausstellers ausgespart werden.

### 6.1.5 Komplexität

Die ISO/IEC 15118-2 Spezifikation umfasst ganze 350 Seiten, auf denen 849 Anforderungen (Requirements)<sup>8</sup> gelistet werden. Die Komplexität einer solchen Spezifikation lässt sich zwar nicht mit metrischen Methoden objektiv messen, aber schon allein diese beiden Zahlen lassen es erahnen. Hinzu kommt, dass thematisch zusammengehörige Informationen wie bspw. zur Sicherheitsthematik über diverse Kapitel und Anhänge verstreut sind. Dies ist zwar der inhaltlichen Strukturierung des Dokuments geschuldet und teilweise auch nachvollziehbar, jedoch schadet es der Übersichtlichkeit und bringt somit bei der ersten Auseinandersetzung mit diesem Dokument eine gewisse komplexe Hürde mit sich.

Im Laufe der Standardisierung stieg durch neu eingeführte Funktionalitäten die Anzahl der niedergeschriebenen Anforderungen in größerem Maße an, als dies für das Verständnis des Lesers zuträglich ist. So wurden Anforderungen, die im Laufe der Zeit von verschiedenen Autoren mit unterschiedlichem Kenntnisstand des gesamten Dokuments eingebracht wurden, nicht immer mit bereits bestehenden ähnlichen Anforderungen zusammengefasst, was u. a. auch dem Zeitdruck geschuldet ist, dem ein solches Normungsdokument oft unterliegt.

Abbildung 6.6 soll einen Eindruck davon verschaffen, mit wie vielen verschiedenen Anforderungen die jeweiligen Zustandsübergänge im SECC beim Anwendungsfall Wechselstromladen behaftet sind. Diese Komplexität bringt eine gewisse Fehleranfälligkeit bei der Implementierung dieser Spezifikation mit sich. Aus diesem Grunde wurde eine Plattform ins Leben gerufen, deren Zweck die Erreichung eines gemeinsamen Verständnisses über die Implementierung dieser Norm ist. Diese ISO/IEC 15118 User Group<sup>9</sup> soll somit die Interoperabilität unterschiedlicher Implementierungen sicherstellen und darüber hinaus eventuelle fehlerhafte Darstellungen der aktuell bestehenden Spezifikationen dokumentieren. Gesammelte Erkenntnisse aus dieser User Group können in eine Neuauflage der ISO/IEC 15118-2 einfließen.

Nachdem nun im ersten Teil des Evaluationskapitels die Zukunftsfähigkeit des ISO/IEC 15118 Protokolls anhand der Kriterien Akzeptanz, Erweiterbarkeit, Sicherheit, Effizienz und Komplexität analysiert worden ist, wird im zweiten Teil das in Abschnitt 4.3 vorgestellte

---

<sup>7</sup>In der finalen Spezifikation entspricht dies der `ChargeParameterDiscoveryRes` Nachricht.

<sup>8</sup>Die größte Requirement-ID ist die 914, was bedeutet, dass 65 Requirements im Laufe der Entwicklung vom DIS zum FDIS überarbeitet wurden und technische Änderungen mit sich brachten.

<sup>9</sup><http://iso15118.fzi.de/redmine/>

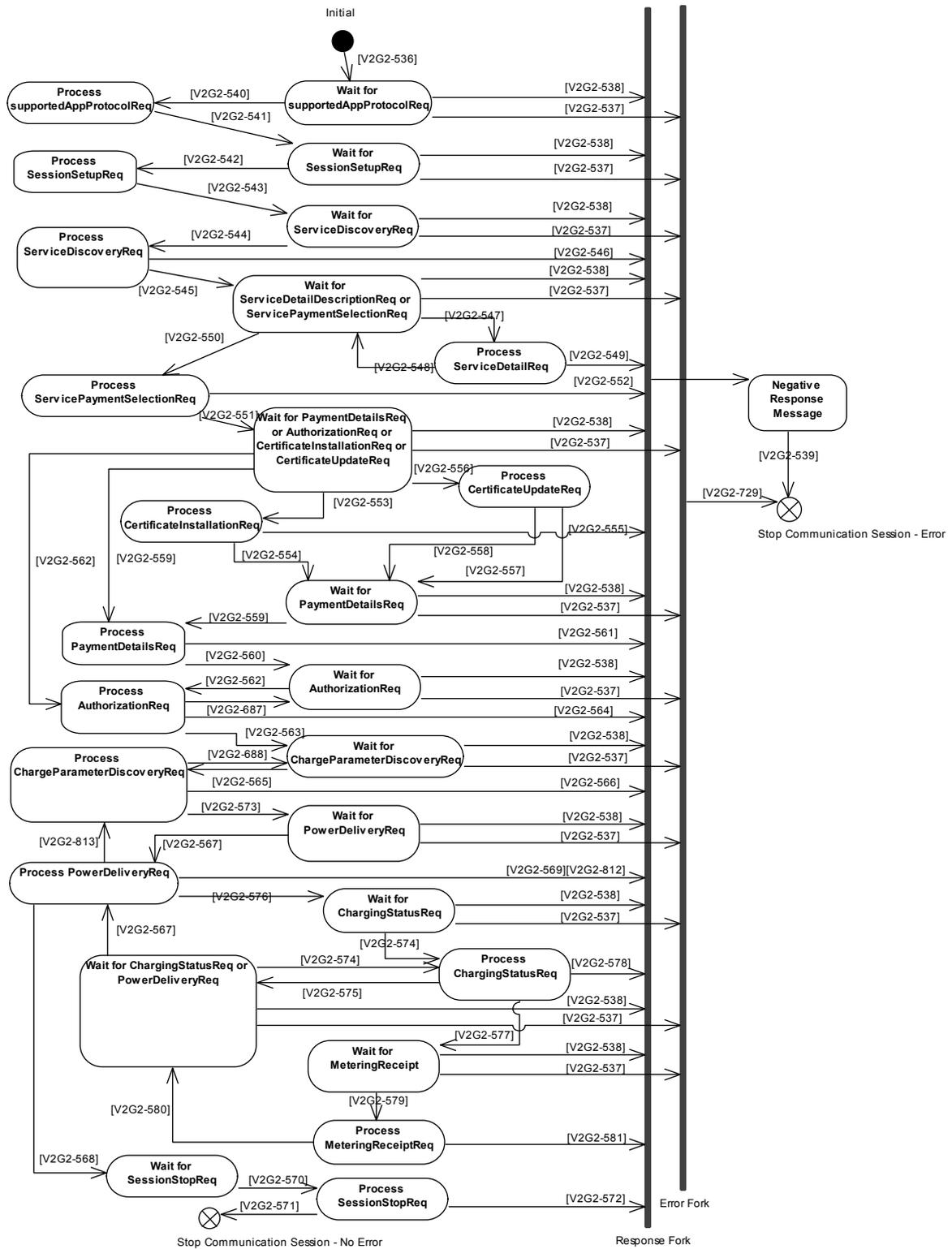


Abbildung 6.6: Zustandsautomat des SECC für das Wechselstromladen [39]

Optimierungsteilproblem evaluiert. Hierbei soll das resultierende Kodierungsschema hinsichtlich der Eignung des Elektrofahrzeugs, kostenoptimal als Verbraucher und Energiespeicher zu fungieren, untersucht werden.

## 6.2 Evaluation des ausgewählten Kodierungsschemas für das Elektrofahrzeug

Das in Abschnitt 3.1 vorgestellte Energy Smart Home Lab (ESHL) kann über das Energiemanagement-System, welches in Abschnitt 3.2 eingeführt wurde, sowohl in einem realen Wohnszenario als auch auf Basis einer Simulation betrieben werden. Die Simulation bietet die Möglichkeit, Auswirkungen unterschiedlicher Optimierungsmechanismen gezielt zu untersuchen und gegenüberzustellen. Der zweite Teil des Evaluationskapitels gliedert sich somit in die folgenden drei Abschnitte:

1. Auswertung des Lastprofils einer realen Wohnphase (Herbst 2013), in der das E-Fahrzeug über Mode 3 (vgl. Abschnitt 2.1.2) und somit nicht gesteuert geladen wurde
2. Auswertung diverser Lastprofile rein simulativer Wohnphasen, in welchen das E-Fahrzeug mittels eines vom Optimierer vorgegebenen Lastprofils gesteuert lädt und rückspeist, wobei teils reale Daten aus der Wohnphase im Herbst 2013 zugrunde gelegt werden
3. Auswertung des Lastprofils einer weiteren realen Wohnphase (Frühjahr 2014), in welcher das E-Fahrzeug bereits über ISO/IEC 15118 mit dem Energiemanagement-System kommuniziert und mittels eines vom Optimierer vorgegebenen Lastprofils gesteuert lädt und rückspeist

### 6.2.1 Auswertung der realen Wohnphase im Herbst 2013

Sämtliche Zuleitungen zu den einzelnen Haushaltskomponenten, den Einspeisern PV-Anlage und BHKW sowie der Ladestation, über die das Elektrofahrzeug angeschlossen ist, sind mit Messeinrichtungen sowie schaltbaren Relais ausgestattet. Auf diese Weise kann einerseits der aktuelle Zustand aller elektrischen Komponenten genau erfasst und andererseits die Stromzufuhr vom Energiemanagement ein- bzw. ausgeschaltet werden.

Im Rahmen der Projektlaufzeit von iZEUS wurde im Herbst 2013 eine mehrwöchige Wohnphase mit Probanden durchgeführt, welche die eingesetzten Optimierungsmechanismen auf ihre Praxistauglichkeit testen sollten. Bei den Probanden handelte es sich um ein junges berufstätiges Paar. Das Elektrofahrzeug wurde u. a. für eine Pendlerstrecke von ca. 28 km (14 km pro Arbeitsweg) genutzt. In dieser achtwöchigen Wohnphase wurden mehrere Variationen von zeitvariablen Preissignalen und Lastgrenzsignalen getestet, um einerseits eine sozioökonomische Untersuchung der Benutzerfreundlichkeit und andererseits eine technische Auswertung der autonomen Optimierung des Energiemanagements durchführen zu können. Im Zuge dieser Evaluation soll der Fokus auf der technischen Auswertung der Optimierung liegen.

Die in Kapitel 4 diskutierte Konzeption und Implementierung eines Optimierungsteilproblems für das Elektrofahrzeug war zum Zeitpunkt der Wohnphase im Herbst 2013 noch nicht vollständig in das Energiemanagement integriert, weshalb in dieser Zeit das Elektrofahrzeug nach Mode 3 und somit nicht intelligent geladen wurde. Eine beispielhafte Woche aus dieser Wohnphase ist in Abbildung 6.7 dargestellt und soll nun kurz erläutert werden.

In diesem Auszug der vierten Woche der Herbstwohnphase sind die zeitlich flexibel steuerbaren Haushaltsgeräte, zu denen die Waschmaschine, der Trockner und die Spülmaschine gehören, als aggregierter Lastgang neben der restlichen, lediglich beobachtbaren Haushaltslast (erzeugt durch bspw. Ofen, Herdplatte, Kaffeemaschine und Licht) abgebildet. Der Lastgang des Elektrofahrzeugs sowie das Einspeiseprofil des BHKWs sind separat ausgewiesen. Der

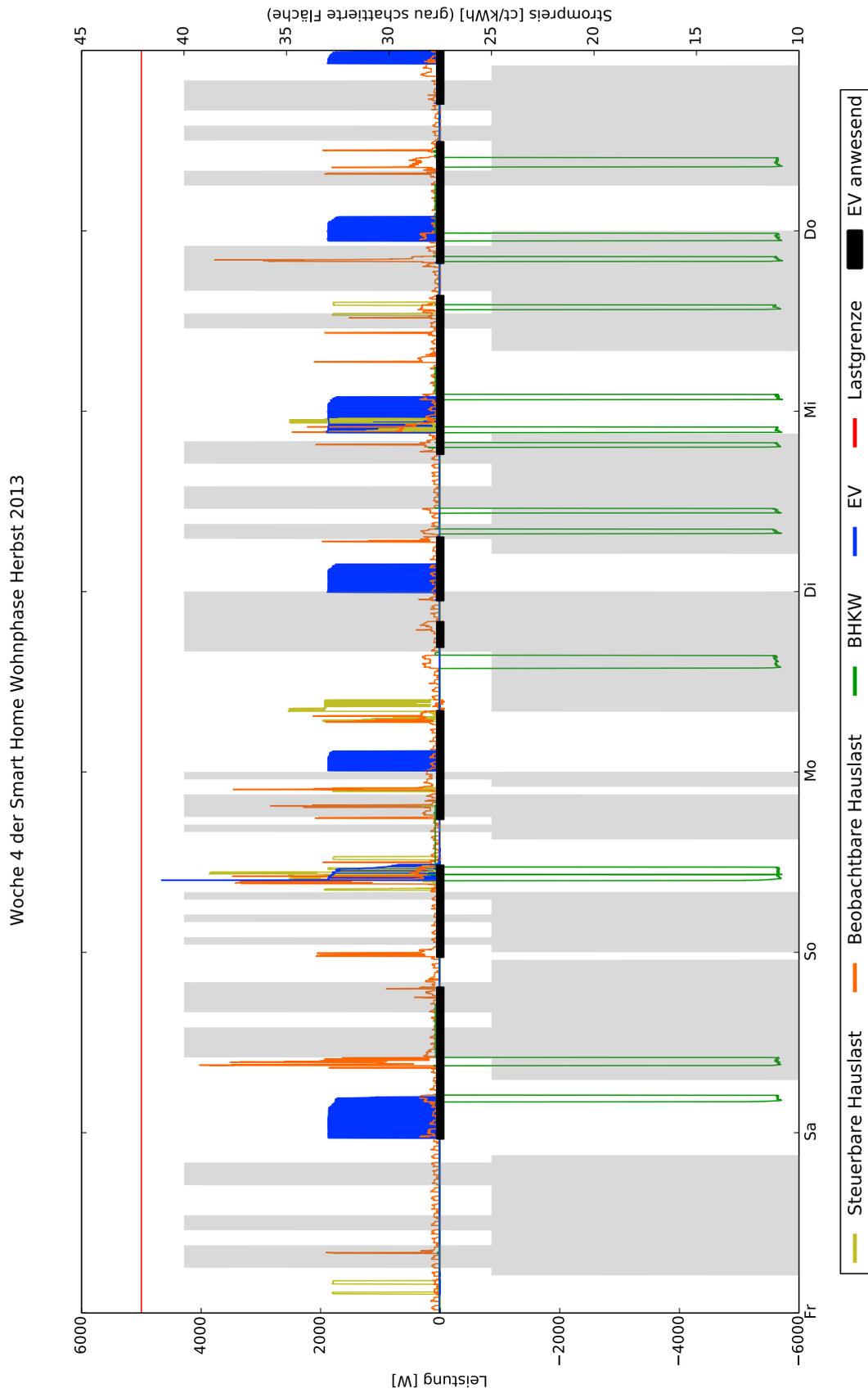


Abbildung 6.7: Auswertung der Lastgänge einzelner Verbraucher sowie des BHKWs in der 4. Woche (Wohnphase 2013)

zeitvariable Strompreis ist als grau schattierte Fläche im Hintergrund illustriert, die entsprechende Skala ist der rechten  $y$ -Achse zu entnehmen. Die Lastgrenze, welche eine weiche Grenze darstellt, deren Überschreitung lediglich zusätzliche Kosten verursacht, jedoch nicht zur Abschaltung des Verbrauchers führt, ist mit der roten Linie gekennzeichnet.

Das in Abschnitt 3.1 vorgestellte Elektrofahrzeug ist zwar in der Lage, dreiphasig mit einer maximalen Leistung von 11 kW zu laden, jedoch wird aus Abbildung 6.7 deutlich, dass von den Probanden die maximale Ladeleistung auf 2 kW begrenzt wurde, um die Lastgrenze durch die zusätzliche Nutzung anderer Haushaltsgeräte nicht zu überschreiten. Die Parkzeiten des Elektrofahrzeugs am Smart Home sind durch die schwarzen horizontalen Balken auf der  $x$ -Achse illustriert. Hierdurch ist ebenfalls deutlich erkennbar, dass das Fahrzeug – bis auf Freitag – nicht sofort nach der Rückkehr von der Arbeit bzw. sich daran anschließender Einkaufswege mit der Ladestation verbunden wurde. Stattdessen wurde immer explizit darauf geachtet, den Ladevorgang erst dann zu starten, wenn der Strompreis auf das Minimum von 10 ct/kWh gefallen war, was an den überwiegend in den späten Abendstunden nahe Mitternacht stattfindenden Ladevorgängen ersichtlich wird.

Weiterhin fällt auf, dass die steuerbaren Haushaltsgeräte nie zum Zeitpunkt des teuersten Strompreises mit 40 ct/kWh, sondern fast immer in den günstigsten Zeitslots (10 ct/kWh) liefen.

Das BHKW diente in dieser Wohnphase als einzige Einspeisequelle, eine Photovoltaik-Anlage stand für diesen Zeitraum nicht zur Verfügung. Die Einspeisevorgänge wurden durch das Energiemanagement veranlasst, einerseits induziert durch die Lastsituation im Smart Home, andererseits durch thermische Restriktionen wie die Unterschreitung einer Schwelltemperatur des Schichtspeichers für die Warmwasserversorgung. Eine erzwungene Erhöhung der Wassertemperatur im Schichtspeicher geht auch stets mit der Erzeugung elektrischer Energie einher. Dies erklärt auch, weshalb elektrische Energie nicht nur während einzelner Ladevorgänge des Elektrofahrzeugs oder der Nutzung diverser Haushaltsgeräte erzeugt wurde, sondern auch in den eher seltenen Zeiträumen dazwischen, in denen keine signifikante Hauslast vorlag.

Da während dieser Wohnphase die von den Benutzern eingestellten Freiheitsgrade<sup>10</sup> nicht erfasst wurden, ist eine identische Nachbildung dieser Wohnphase in der Simulation leider nicht möglich. So hätte diese Wohnphase als Benchmark genutzt werden können, um ein fast identisches Vergleichsszenario nachzubilden, in welchem stattdessen die Batterie des E-Fahrzeugs auf intelligente, vom Energiemanagement vorgegebene Weise geladen und sogar Energie rückgespeist würde. Nichtsdestotrotz sollen die realen Ankunfts- und Abfahrtszeiten mit dem Elektrofahrzeug sowie die jeweiligen Batterieladezustände (Start-SOC) in der Simulation abgebildet werden. Abschnitt 6.2.2 wird daher neben den Batterie- und Fahrzeugdaten auch das Strompreis- und Lastbegrenzungssignal für diese beispielhafte Woche im Herbst 2013 aufgreifen und verschiedene Simulationsszenarien gegenüberstellen.

Hierzu bedarf es zusätzlicher Informationen, die über die im Smart Home aufgezeichneten Daten nicht bereitgestellt wurden. Es ließe sich zwar über die gemessene Spannung an der Steckdose der Ladestation ermitteln, über welchen Zeitraum das Elektrofahrzeug mit ebendieser auch über den Ladevorgang hinaus verbunden war, jedoch fehlt für die Ermittlung der gesamten Standdauer – und somit der zeitlichen Flexibilität für die Ladung – der Ankunftszeitpunkt am Smart Home. Des Weiteren lässt sich der Ladezustand der Batterie bei

---

<sup>10</sup>Unter einem Freiheitsgrad soll hier die Zeitspanne zwischen der Programmierung der Haushaltskomponente Waschmaschine, Trockner oder Spülmaschine und dem vom Hausbewohner vorgegebenen, spätest möglichen Endzeitpunkt für die Abarbeitung des jeweils eingestellten Programms verstanden werden.

Ankunft am Smart Home anhand der Lastkurve nur unpräzise berechnen, da die Information über die benötigte Energie der Nebenverbraucher im E-Fahrzeug fehlt. Diese fehlenden Informationen lassen sich jedoch über die Logdaten des Elektrofahrzeugs direkt ermitteln. Die Ankunfts- und Abfahrtszeitpunkte ergeben sich durch eine Korrelation des Zeitstempels mit den aufgezeichneten GPS-Koordinaten. Aus diesen Informationen resultieren die bereits dargestellten schwarzen Balken. Die Werte für den benötigten Energiegehalt (`eAmount`) sowie die zur Rückspeisung zur Verfügung stehende Energiemenge (`eAmountDischarge`) lassen sich anhand des aufgezeichneten Ladezustands (SOC), der bekannten Batteriekapazität sowie des eingestellten Mindestladezustands, welcher `eAmountDischarge` direkt beeinflusst, berechnen. Es wird für das Simulationsszenario angenommen, dass stets die minimal einstellbare Mindestreichweite von 18 km ( $\cong 30\%$  SOC) gilt. Die resultierenden Informationen aus den Logdaten des Fahrzeugs sind in Tabelle 6.5 gelistet.

Tabelle 6.5: Standzeiten am Smart Home sowie energierelevante Daten des Elektrofahrzeugs in Woche 4 der Herbstwohnphase

Präsenz ESHL	Ladebeginn	Start-SOC	Ladeende	End-SOC	Ladedauer
Fr 23:09 – Sa 19:22	23:12	27 %	04:40	100 %	5 h 27 min
Sa 23:19 – So 11:36	9:28	71 %	11:35	98 %	2 h 6 min
So 17:40 – Mo 08:09	00:04	61 %	02:41	97 %	2 h 36 min
Mo 16:34 – Mo 20:00	–	68 %	–	68 %	–
Mo 22:46 – Di 07:16	23:48	46 %	03:33	96 %	3 h 45 min
Di 18:15 – Mi 15:24	21:03	33 %	01:49	98 %	4 h 45 min
Mi 19:39 – Do 11:52	22:34	53 %	01:46	97 %	3 h 12 min
Do 16:51 – Fr 09:24	22:10	70 %	00:14	98 %	2 h 4 min

## 6.2.2 Lastgänge simulativer Wohnphasen

Die Simulationsumgebung des EMS stellt diverse Parameter zur Verfügung, über die der charakteristische Lastgang eines simulierten Haushalts beeinflusst werden kann. Die wesentlichen Kenngrößen sind die folgenden:

- Anzahl der Bewohner (2 bis 5)
- Simulierte (steuerbare wie auch nicht steuerbare) Haushaltsgeräte
- Einsatz eines BHKWs als steuerbarer dezentraler Erzeuger
- Einsatz einer PV-Anlage als nicht steuerbarer dezentraler Erzeuger
- Nutzung eines Elektrofahrzeugs mit konfigurierbaren Batteriekennwerten
- Ankunfts- und Abfahrtszeiten des Elektrofahrzeugs sowie die SOC-Werte bei Ankunft
- Simulationszeitraum während eines Jahres
- Zeitvariables Strompreissignal
- Zeitvariables Lastbegrenzungssignal

Ziel des evolutionären Algorithmus ist die Bestimmung eines kostenminimalen Gesamtlastgangs über alle simulierten beobachtbaren und steuerbaren Haushaltskomponenten und dezentralen Erzeuger. Die Stellgrößen für den evolutionären Algorithmus wurden so gewählt, wie sie auch schon in [3] Verwendung fanden. Es hat sich gezeigt, dass durch Veränderungen dieser Parameter keine nennenswerten Verbesserungen hinsichtlich eines kostenoptimalen Lastprofils erzielt werden konnten. Daher finden die hier gelisteten Werte Anwendung:

- Anzahl Individuen pro Generation: 100
- Anzahl Generationen: 100
- Mutationsrate: 0,095
- Selektionswahrscheinlichkeit: 0,80
- Turnierselektion mit zwei Individuen (Binary Tournament) [74]
- Das jeweils beste Individuum wird in die Nachfolgeneration übernommen (Elitismus)

Da jedes Individuum einzeln evaluiert wird, ergeben sich aus einer Population von 100 Individuen und 100 Generationen insgesamt 10.000 Evaluationen.

Die Kosten für den von der PV-Anlage und dem BHKW erzeugten und selbst verbrauchten Strom liegen bei 0 ct/kWh. Daher ist es aus Sicht einer kostenbasierten Optimierung sinnvoll, einen möglichst hohen Eigenstromverbrauch zu erzielen. Es werden im Rahmen der durchgeführten Simulationen vom Optimierungsalgorithmus keine Einspeisevergütungen berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass es stets günstiger ist, den selbst erzeugten Strom zur Deckung der lokalen Haushaltslast zu verwenden (vgl. auch Integrationszenario 1 aus Abschnitt 1.1 und [40]).

In den folgenden Auswertungen der durchgeführten Simulationen soll das Potential gezeigt werden, welches ein gesteuertes Lade- und Rückspeiseverhalten des E-Fahrzeugs auf Basis der Entscheidungen des Energiemanagements sowohl für die Steigerung des Eigenstromverbrauchs als auch insgesamt für die Senkung der Stromkosten mit sich bringt. Die Höhe der Kosteneinsparung hängt in erheblichem Maße auch von der Spreizung des zeitvariablen Strompreissignals ab, also der Differenz zwischen dem teuersten und dem günstigsten Strompreis.

Das *Lade- und Rückspeiseverhalten des Elektrofahrzeugs* lässt sich am besten anhand eines dargestellten Wochenlastgangs analysieren, weshalb die Simulation eines gesamten Jahres und somit die Jahresdurchschnittswerte in dieser Evaluation nicht im Fokus stehen. In Abschnitt 6.2.1 wurde eine beispielhafte Woche aus der Wohnphase im Herbst 2013 diskutiert, die als Grundlage für die Simulationen in diesem Abschnitt dient. Abschnitt 6.2.3 hingegen wird auf eine beispielhafte Woche im Mai 2014 eingehen. Der wesentliche Unterschied dieser beiden Wohnphasen liegt darin, dass im Gegensatz zur zweiten Wohnphase in der ersten kein gesteuerter Lade- geschweige denn Rückspeisevorgang stattfand, sondern gemäß Mode 3 (vgl. Abschnitt 2.1.2) geladen wurde. Um eine gewisse Vergleichbarkeit der simulierten Wohnphasen mit real durchgeführten Wohnphasen zu ermöglichen und ebenso *saisonale Unterschiede* zu berücksichtigen, wird jeweils dieselbe beispielhafte Woche im Frühjahr und im Herbst simuliert. Ebenso kommen in der Simulation dieselben zeitvariablen *Strompreis- und Lastbegrenzungssignale* zum Einsatz, wie sie auch in der entsprechenden Woche der realen Wohnphase Verwendung fanden. Selbiges gilt auch für das Mobilitätsprofil des Elektrofahrzeugs.

Die Simulation der *Haushaltsgeräte* basiert auf Erfahrungswerten vergangener Wohnphasen im ESHL während der Durchführung des Forschungsprojekts MeRegioMobil, Details hierzu sind [3] zu entnehmen. Es werden die Lastgänge von insgesamt fünf Haushaltsgeräten simuliert:

1. Geschirrspülmaschine (steuerbar)
2. Waschmaschine (steuerbar)
3. Trockner (steuerbar)
4. Ofen (nur beobachtbar)
5. Herdplatte (nur beobachtbar)

Darüber hinaus wird zusätzlich eine gewisse Grundlast simuliert, wie sie bspw. durch Standby-Geräte erzeugt wird. Während eine zeitliche Verschiebung der Haushaltsgeräte Ofen und Herdplatte aus Benutzungskomfortsicht nicht infrage kommt, ist es bei den drei Komponenten Geschirrspülmaschine, Waschmaschine und Trockner nicht unbedingt erforderlich, dass diese sofort nach Beladung und Programmierung starten. Der jeweilige Programmstart kann daher vom Energiemanagement zeitlich flexibel gesteuert werden, sodass diese Geräte kostenoptimal eingeplant und zum voreingestellten Endzeitpunkt spätestens ihren Programmablauf beendet haben. Hierfür werden ebenfalls zufällige Freiheitsgrade simuliert.

Die zu simulierende *PV-Anlage* hat eine Leistung von 4,6 kWp und entspricht der realen PV-Anlage, welche während des Projektzeitraums von MeRegioMobil auf dem ESHL installiert war. Aufgrund von Umbaumaßnahmen steht diese PV-Anlage real nicht mehr zur Verfügung, weshalb sie auch nicht in den dargestellten Lastgängen aus Abschnitt 6.2.1 und 6.2.3 zu finden ist. Das simulierte PV-Einspeiseprofil entspricht einem saisonal abhängigen Standardeinspeiseprofil für die südwestliche Region Deutschlands, in welcher sich auch das Smart Home befindet.

Das *BHKW* hat eine Einspeiseleistung von 5,2 kW. Die simulierten Einspeisevorgänge sind einerseits durch die Lastsituation im Smart Home und andererseits durch thermische Restriktionen wie die Unterschreitung einer Schwelltemperatur des Schichtspeichers für die Warmwasserversorgung induziert. Eine erzwungene Erhöhung der Wassertemperatur im Schichtspeicher geht auch stets mit der Erzeugung elektrischer Energie einher.

Es werden im Folgenden nun 16 Konstellationen simuliert, welche in Tabelle 6.6 zusammengefasst sind. Dieser Abschnitt wird auf die ersten acht Simulationen der Herbstsaison eingehen und die Ergebnisse darstellen, während die Simulationsergebnisse aus der Frühjahrsaison im Zuge des Abschnitts 6.2.3 präsentiert werden.

Sämtliche Simulationen werden mit einem identischen Initialisierungsvektor gestartet, welcher sicherstellt, dass identische Konfigurationen gemäß Tabelle 6.6 bei mehreren Durchläufen auch stets dieselben Ergebnisse liefern. Lediglich die hier präsentierten “Stellschrauben” Personenanzahl, Saison sowie Erzeuger- und Verbraucherkonstellation führen zu unterschiedlichen Gesamtlastgängen.

Zusätzlich sei erwähnt, dass als minimale Lade- bzw. Rückspeisedauer ein Zeitintervall von 10 Minuten gewählt wurde. Dies ermöglicht einerseits eine ausreichende Reaktionsfähigkeit auf die Hauslast und wirkt andererseits einer zu starken Oszillation des E-Fahrzeuglastprofils entgegen. Das Fahrzeug kann, wie auch im realen Szenario, mit maximal 11 kW und minimal 2 kW laden sowie mit den Leistungsstufen -1,2 kW, -2,5 kW und -4,2 kW Energie rückspeisen.

Tabelle 6.6: Simulationsdurchläufe mit diversen Parameterkonstellationen

PV + BHKW	Herbst 2013		Frühjahr 2014	
	2 Personen	5 Personen	2 Personen	5 Personen
ohne	A: EV optimiert B: EV unopt.	E: EV optimiert F: EV unopt.	I: EV optimiert J: EV unopt.	M: EV optimiert N: EV unopt.
mit	C: EV optimiert D: EV unopt.	G: EV optimiert H: EV unopt.	K: EV optimiert L: EV unopt.	O: EV optimiert P: EV unopt.

**Simulation A: 2 Personen, ohne PV und BHKW, E-Fahrzeug optimiert**

Da weder PV-Anlage noch BHKW als Einspeisequelle zur Verfügung stehen, muss das Elektrofahrzeug dazu genutzt werden, durch gezielte Rückspeisevorgänge die Stromkosten zu reduzieren. So ist in dieser Simulation (vgl. Abbildung 6.8) beispielhaft zu erkennen, dass gezielt Samstagmittag, Mittwochmittag/-nachmittag sowie Donnerstagabend sowohl steuerbare als auch nicht steuerbare Haushaltsgeräte durch Rückspeisevorgänge mit Energie aus der Fahrzeugbatterie versorgt werden. Nicht alle Rückspeisevorgänge erscheinen dem Betrachter auf Anhieb sinnvoll, was zu einem gewissen Grad dem Zufälligkeitscharakter des evolutionären Algorithmus zuzuschreiben ist. Wie bereits in Abschnitt 3.2 beschrieben, liefert eine Metaheuristik nicht notwendigerweise das bestmögliche Ergebnis, aber eine in gegebener Rechenzeit hinreichend gute Lösung.

Es ist des Weiteren deutlich zu erkennen, dass bei Ankunft am Freitagabend die 27% SOC zu einem sofortigen Ladevorgang mit maximaler Leistung von 11 kW führen. Weitere Ladevorgänge mit dieser Leistung sind fortan nur noch kurz vor Abfahrt zu verzeichnen. Dies ist folgendermaßen zu begründen:

Das jeweilige Zeitfenster, welches dem Teilproblem Elektrofahrzeug zur Optimierung zur Verfügung steht, ist auf drei Stunden begrenzt, um die Länge des Bitvektors (Genotyps) in Grenzen zu halten. Erst im letzten Zeitfenster, welches den Abfahrtszeitpunkt mit einschließt, sorgt der Optimierungsalgorithmus dafür, dass das Fahrzeug zum Abfahrtszeitpunkt eine vollgeladene Batterie aufweist. Wie bereits in Abschnitt 4.3.4 beschrieben, werden hierbei in einem Korrekturmechanismus die Zeitintervalle des letzten Zeitfensters vom Abfahrtszeitpunkt aus chronologisch rückwärts durchlaufen und die entsprechend maximal mögliche Leistungsstufe festgesetzt, bis sämtliche benötigte Energie geladen wurde. Es gilt für den Optimierer die Prämisse, dass das Fahrzeug einerseits so schnell wie möglich den vorgegebenen minimalen Ladezustand aufweisen und andererseits zum Abfahrtszeitpunkt vollgeladen sein muss. Aufgrund dieser harten Restriktionen, wie sie in Abschnitt 4.3.2 eingeführt wurden, werden eventuell auftretende Zusatzkosten vernachlässigt.

Darüber hinaus fällt auf, dass das E-Fahrzeug fast durchgehend mit der minimal möglichen Ladeleistung zu den vorwiegend günstigen Zeitintervallen mit 10 ct/kWh und 25 ct/kWh geladen wurde. Auch die steuerbaren Haushaltsgeräte kamen meist in diesen Zeitslots zum Einsatz.

**Simulation B: 2 Personen, ohne PV und BHKW, E-Fahrzeug unoptimiert**

In Szenario B, welches im Gegensatz zu Szenario A den ungesteuerten Ladevorgang des Elektrofahrzeugs darstellt (vgl. Abbildung 6.9), wird gleich bei Ankunft am Smart Home damit begonnen, die Batterie vollzuladen. Dies führt dazu, dass entsprechend oft mit 11 kW zum teuersten Strompreis von 40 ct/kWh geladen wird, wie es bspw. am Montag, Dienstag, Mittwoch und Donnerstag der Fall ist. Die steuerbaren Haushaltsgeräte hingegen werden nie zu Zeiten des teuersten Strompreises betrieben, der überwiegende Teil sogar zum günstigsten

Tarif von 10 ct/kWh.

Es lässt sich somit feststellen, dass der ungesteuerte Ladevorgang zumindest in einem Szenario ohne dezentral einspeisende Energiequellen einen kostentechnischen Nachteil mit sich bringt, wie es auch in Tabelle 6.7 nachzulesen ist.

### **Simulation C: 2 Personen, mit PV und BHKW, E-Fahrzeug optimiert**

In Simulation C werden zum ersten Mal auch die Einspeisequellen PV-Anlage sowie BHKW mit einbezogen. Das PV-Einspeiseprofil entspricht wie bereits erwähnt einem Standard E0-Einspeiseprofil für die südwestliche Region Deutschlands im Monat November. Das BHKW wird sowohl elektrisch als auch thermisch geführt betrieben. Dies bedeutet, dass das BHKW nicht nur dann elektrische Energie erzeugt, wenn das Energiemanagement eine hohe geplante Last im Haus feststellt, sondern auch, sobald die vordefinierte Grenztemperatur des Warmwasserschichtspeichers Gefahr läuft, unterschritten zu werden. Die Temperatur des Schichtspeichers darf jedoch auch eine gewisse Grenztemperatur nicht überschreiten, was u. a. dazu führen kann, dass das BHKW keine elektrische Energie erzeugt, obwohl dies vom Energiemanagement aufgrund der Hauslast so vorgesehen wäre.

Aufgrund der Tatsache, dass die energierelevanten Mehrwertinformationen (aktueller Energiebedarf, rückspeisefähige Energiemenge, aktueller SOC, gewünschter Abfahrtszeitpunkt) des E-Fahrzeugs über den ISO/IEC 15118 Treiber dem Energiemanagement-System zur Verfügung gestellt werden, kann das BHKW entsprechend eingeplant werden. In dieser Simulation (vgl. Abbildung 6.10) ist daher eine sehr hohe Korrelation zwischen Ladephasen mit insbesondere hoher Ladeleistung und Einspeisevorgängen durch das BHKW mit standardmäßig -5,2 kW festzustellen. Wie bereits in Simulation A festgestellt, finden in dieser Simulation die Ladevorgänge mit 11 kW kurz vor dem Abfahrtszeitpunkt statt, um eine vollgeladene Batterie zu gewährleisten. Ähnlich zu Simulation A sind auch hier die favorisierten Ladevorgänge mit der minimal möglichen Ladeleistung von 2 kW festzustellen, überwiegend im günstigsten Zeitabschnitt mit 10 ct/kWh.

### **Simulation D: 2 Personen, mit PV und BHKW, E-Fahrzeug unoptimiert**

In diesem letzten simulierten 2-Personen-Haushalt-Szenario (vgl. Abbildung 6.11) wird das Elektrofahrzeug wiederum nicht gesteuert geladen, sondern über den analogen Mode 3-Mechanismus. Deshalb liegen dem Energiemanagement-System auch keine planbaren Informationen für die zu erwartende Last durch das E-Fahrzeug vor. Daher kann das BHKW auch nicht gezielt Energie für diese Ladephasen bereitstellen. Lediglich die Ladevorgänge am Dienstag- und Mittwochabend korrelieren mit einem Ladevorgang des E-Fahrzeugs, wobei dies mit der drohenden Unterschreitung der Schichtspeichertemperatur zu tun haben dürfte und daher eher eine zufällige zeitliche Übereinstimmung darstellt.

### **Simulation E bis H: 5 Personen in einer Herbstwoche**

Die Simulationen E bis H (vgl. Abbildung 6.12 bis 6.15) ähneln den Simulationen A bis D, mit dem Unterschied, dass die Nutzung steuerbarer wie beobachtbarer Haushaltsgeräte dem Profil eines 5-Personen-Haushalts statt eines 2-Personen-Haushalts entspricht. Es sind hierbei ähnliche Tendenzen zu erkennen, wie sie bereits diskutiert wurden.

In allen dargestellten Simulationsläufen wurde der Übersichtlichkeit wegen auf die Visualisierung einer Summenlastkurve verzichtet. Es ist jedoch festzuhalten, dass die einzigen Momente, in denen die jeweiligen Lastgrenzen überschritten wurden, diejenigen sind, in denen

das Elektrofahrzeug entweder geladen wurde, um den eingestellten Mindestladezustand bei Ankunft oder eine vollgeladene Batterie kurz vor der Abfahrt zu gewährleisten. Dies bedeutet, dass durch das Scheduling des Energiemanagements stets erfolgreich eine extreme Verteuerung des Strompreises vermieden wurde, sofern nicht explizit aufgrund von Restriktionen des Elektrofahrzeugs mit höherer Priorität dagegen gesteuert wurde. Letzten Endes können aber auch diese Lastgrenzenüberschreitungen in zukünftigen Arbeiten durch ein weiter optimiertes Design des globalen Optimierers vermieden werden. Bisher ist es dem Teilproblem Elektrofahrzeug nicht möglich, im Zuge des Durchlaufens des evolutionären Algorithmus (vgl. Abbildung 3.3) das Strompreis- bzw. Lastbegrenzungssignal in die Evaluation miteinzubeziehen. Wenn also der Reparaturmechanismus, welcher bspw. die Restriktion “vollgeladene Batterie zum Abfahrtszeitpunkt” sicherstellt, aktiv wird, so kann nicht festgestellt werden, ob bspw. ein Ladevorgang mit 11 kW kurz vor Abfahrt die Lastgrenze überschreiten würde und es daher evtl. sinnvoller wäre, mit geringerer Leistung dafür aber länger zu laden.

### Bepreisung der simulierten Gesamtlastgänge

Die Gesamtlast  $P_{ges}(t)$  der simulierten Wochenlastgänge zum jeweiligen *Zeitpunkt*  $t$  ergibt sich gemäß (6.1) aus der Addition der kumulierten Last aller steuerbaren wie beobachtbaren Haushaltsgeräte und des Elektrofahrzeugs auf der Verbraucherseite mit dem Einspeiseprofil der PV-Anlage, des BHKWs und der rückgespeisten Energie des E-Fahrzeugs auf der Erzeugerseite.

$$P_{ges}(t) = P_{Haus}(t) + P_{PV}(t) + P_{BHKW}(t) + P_{EV}(t) \quad (6.1)$$

Die Kosten  $K(t)$  für ein *Intervall*  $t$  ergeben sich gemäß (6.2) aus dem Produkt der Gesamtlast  $P_{ges}(t)$ <sup>11</sup> und dem zeitvariablen Strompreissignal  $SPS(t)$ , falls die Gesamtlast pro Zeitabschnitt das jeweils geltende Lastbegrenzungssignal  $LBS(t)$  nicht überschreitet. Für die Zeitabschnitte, in denen die Lastgrenze überschritten wird, wird ein zusätzlicher Straffaktor  $SF$  hinzugerechnet. Dieser Straffaktor entspricht in den real durchgeführten Wohnphasen sowie den Simulationen dem Fünffachen des jeweils geltenden Strompreises.

Die der Optimierung zugrunde liegende Zielfunktion berücksichtigt keinerlei Einspeisevergütungen aus den bereits erwähnten Gründen. Für die von der PV-Anlage eingespeiste elektrische Energie, die die Haushaltslast zum jeweils gegebenen Zeitpunkt übersteigt, wird jedoch eine Einspeisevergütung von 14,07 ct/kWh für die Herbstwochen sowie 13,14 ct/kWh für die Frühjahrswochen zugrunde gelegt. Diese Vergütungssätze entsprechen den Vorgaben aus §32 Abs. 2 Erneuerbare-Energien-Gesetz für Dachanlagen bis 10 kWp [14]. Bisher gelten noch keine Einspeisevergütungen für aus der Fahrzeugbatterie eingespeiste Energie, da – bis auf den Mitsubishi Outlander – auf dem Markt noch keine Fahrzeuge existieren, die technisch dazu in der Lage wären. Im Rahmen der vorgestellten realen Wohnphasen sowie Simulationen wird jedoch für aus dem Fahrzeug rückgespeiste Energie, die die Hauslast übersteigt, der gleiche Vergütungssatz wie für die PV-Anlage angesetzt.

Energie, welche über PV-Anlage und E-Fahrzeug hinaus durch das BHKW in das Netz eingespeist wird, wird dagegen mit einem Vergütungssatz von 5,41 ct/kWh bepreist [13].

<sup>11</sup>Bei der Berechnung der Kosten entspricht  $t$  einem Intervall, somit entspricht  $P_{ges}(t)$  hierbei der gemittelten Last in diesem Intervall.

Sämtliche Vergütungssätze werden in (6.2) unter  $EST$  (Einspeisetarif) zusammengefasst.

$$K(t) = \begin{cases} P_{ges}(t) \times SPS(t) & \text{falls } 0 \leq P_{ges}(t) \leq LBS(t), \\ P_{ges}(t) \times SPS(t) + SF \times (P_{ges}(t) - LBS(t)) \times SPS(t) & \text{falls } P_{ges}(t) > LBS(t), \\ P_{ges}(t) \times EST & \text{falls } P_{ges}(t) < 0. \end{cases} \quad (6.2)$$

Die Gesamtkosten  $K_{ges}$  berechnen sich gemäß (6.3), wobei  $\mathbb{T}$  der Dauer einer simulierten Woche entspricht:

$$K_{ges} = \sum_{t \in \mathbb{T}} K(t) \quad (6.3)$$

Die *Zielfunktion*, die die Kosten für den Gesamtfahrplan des Haushalts im jeweils aktuellen Optimierungshorizont  $T \in \mathbb{T}$  minimiert, entspricht somit:

$$\min(K_{ges}) \quad (6.4)$$

Tabelle 6.7 listet die Stromkosten aller simulierten Wochenlastgänge im Herbst auf, wobei die Simulationen mit den ungesteuerten Ladevorgängen in der rechten Kostenspalte zu finden sind.

Tabelle 6.7: Stromkosten aller simulierten Wochenlastgänge im Herbst (inkl. Strafkosten für Lastgrenzenüberschreitung)

<b>Simulation</b>	<b>Kosten [€]</b>	<b>Simulation</b>	<b>Kosten [€]</b>
Simulation A	40,43	Simulation B	73,38
Simulation C	10,54	Simulation D	49,45
Simulation E	47,41	Simulation F	88,83
Simulation G	16,41	Simulation H	57,90

Würde man die extreme Verteuerung der Stromkosten bei Überschreitung der Lastbegrenzungskurve außer Acht lassen, so würden sich die Stromkosten auf die Beträge laut Tabelle 6.8 belaufen:

Tabelle 6.8: Stromkosten aller simulierten Wochenlastgänge im Herbst (keine Strafkosten für Lastgrenzenüberschreitung)

<b>Simulation</b>	<b>Kosten [€]</b>	<b>Simulation</b>	<b>Kosten [€]</b>
Simulation A	28,78	Simulation B	30,18
Simulation C	9,22	Simulation D	16,65
Simulation E	38,75	Simulation F	41,46
Simulation G	13,47	Simulation H	21,11

Es ist somit deutlich zu erkennen, dass das vom Energiemanagement vorgegebene optimierte Lastprofil für das Elektrofahrzeug in allen simulierten Szenarien einen Kostenvorteil mit sich bringt. Im Falle der simulierten Lastgrenze können mittels eines gesteuerten Lade- und Rückspeisevorgangs die Hälfte bis zu ca. drei Viertel der Stromkosten eingespart werden, was ein erhebliches Potential darstellt.

Die Werte gemäß Tabelle 6.8 liegen der Annahme zugrunde, dass in naher Zukunft noch keine Lastgrenze – bspw. vom Energievertrieb in Absprache mit dem Netzbetreiber – über ein Smart Meter an das Energiemanagement eines Haushalts kommuniziert werden wird, aber eine hohe Preisspreizung von 10 ct/kWh bis zu 40 ct/kWh als Anreiz für einen gesteuerten Ladevorgang realistisch wäre. Hierbei sind die Einsparpotentiale im Falle fehlender Einspeisequellen wie PV-Anlage oder BHKW erheblich geringer, können jedoch im entgegengesetzten Fall ein Drittel bis knapp die Hälfte der Kosten ausmachen.

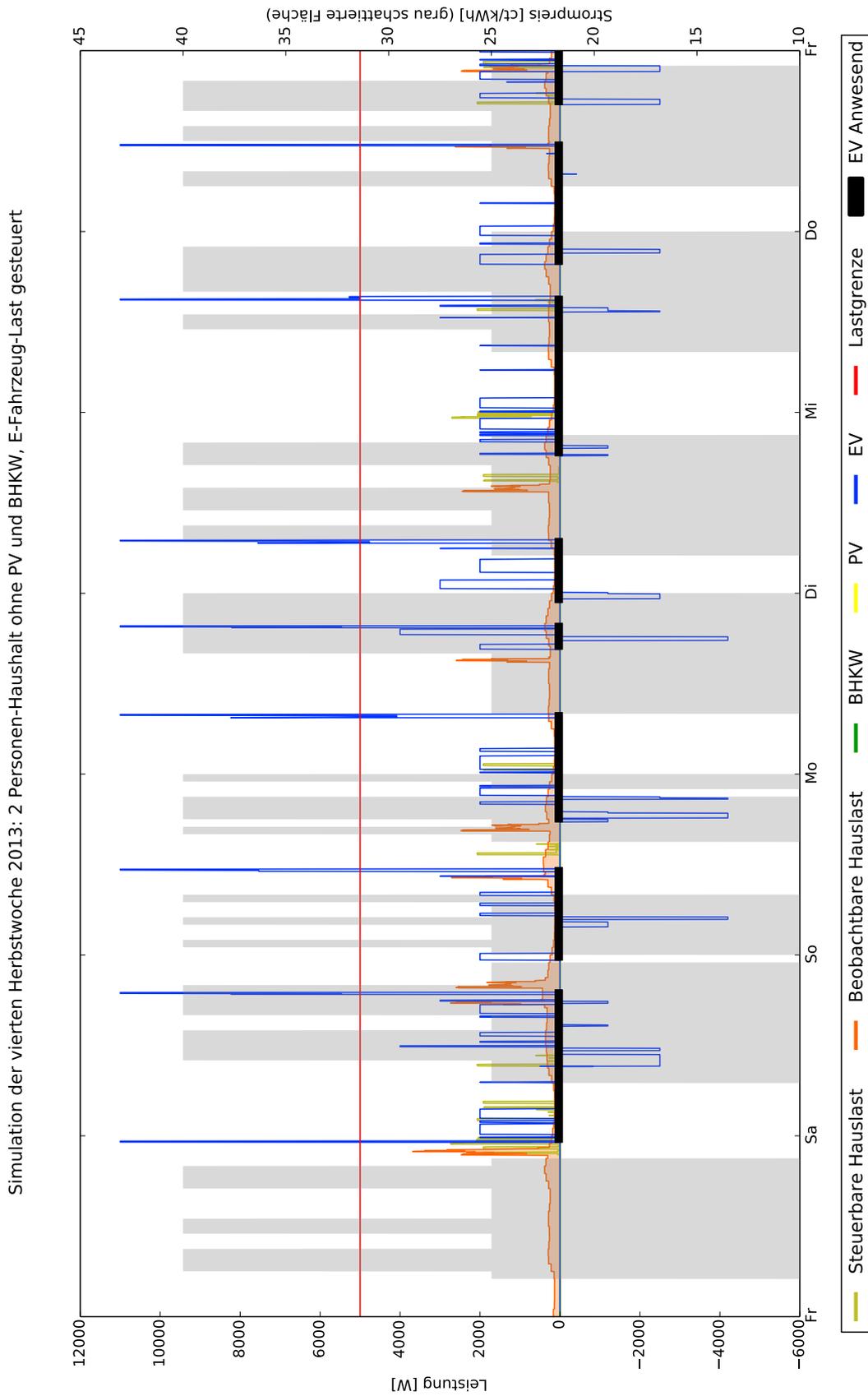


Abbildung 6.8: Simulation A (Herbst, 2 Personen, ohne PV/BHKW, EV-Last gesteuert)

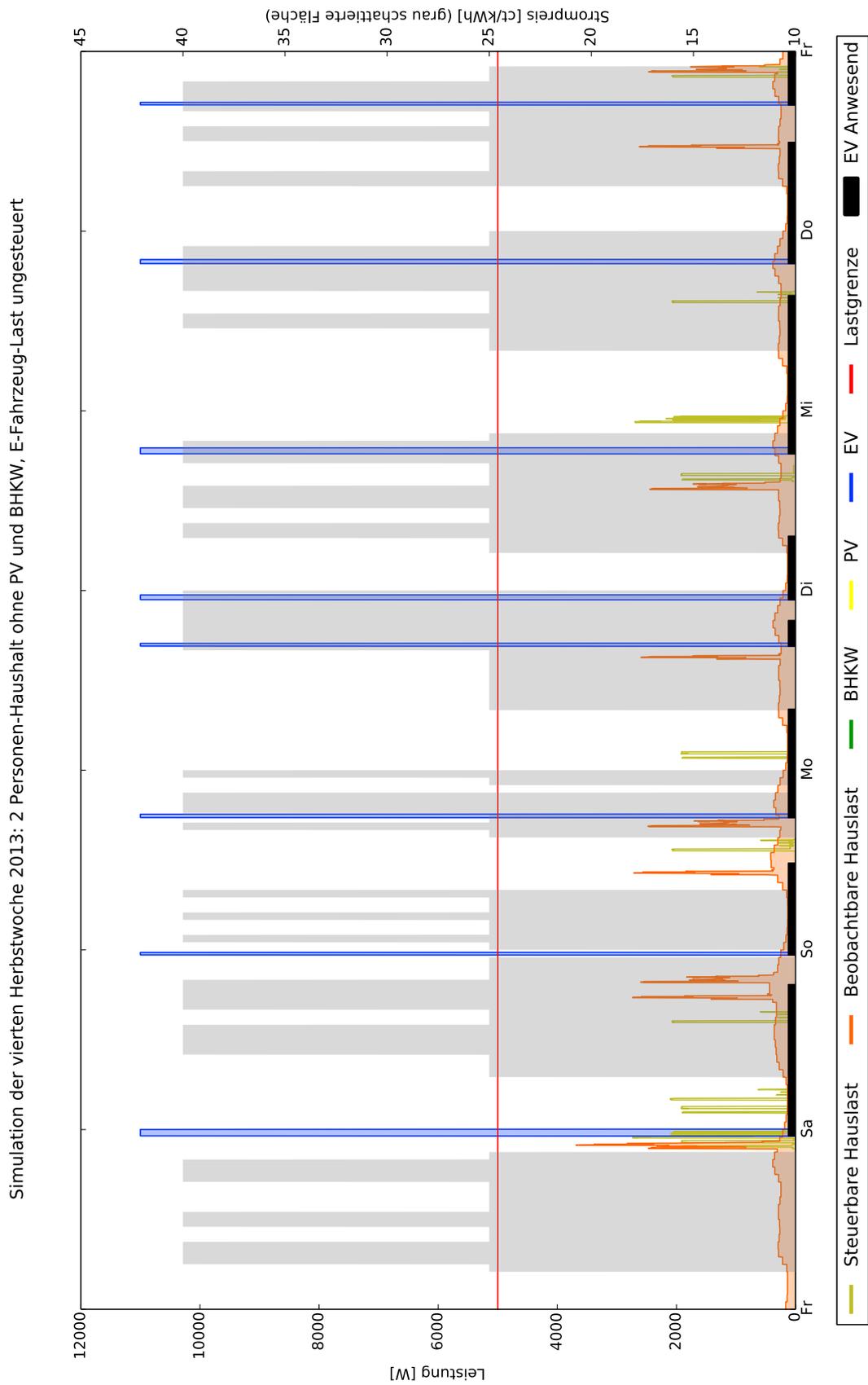


Abbildung 6.9: Simulation B (Herbst, 2 Personen, ohne PV/BHKW, EV-Last ungesteuert)

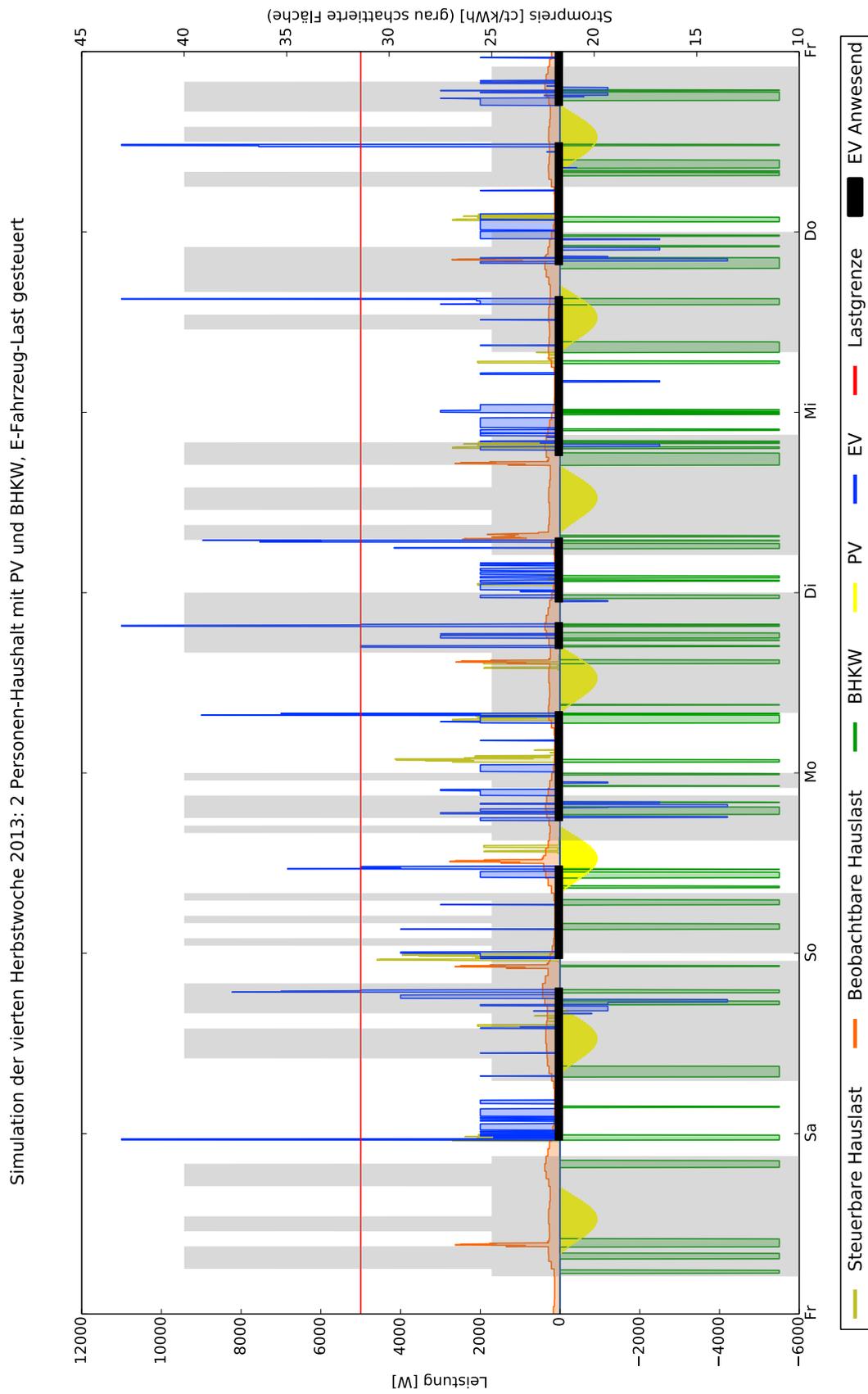


Abbildung 6.10: Simulation C (Herbst, 2 Personen, mit PV/BHKW, EV-Last gesteuert)

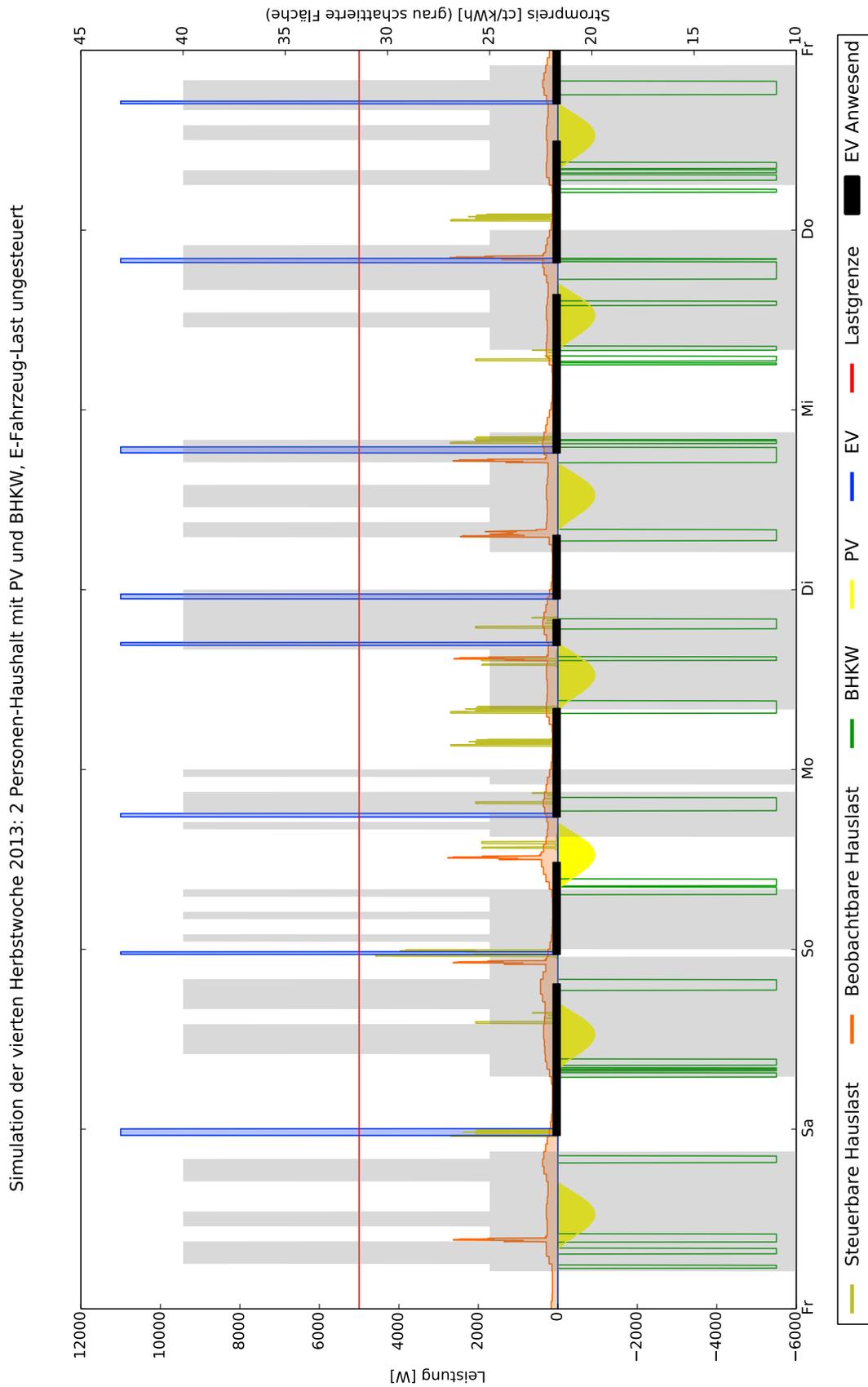


Abbildung 6.11: Simulation D (Herbst, 2 Personen, mit PV/BHKW, EV-Last ungesteuert)

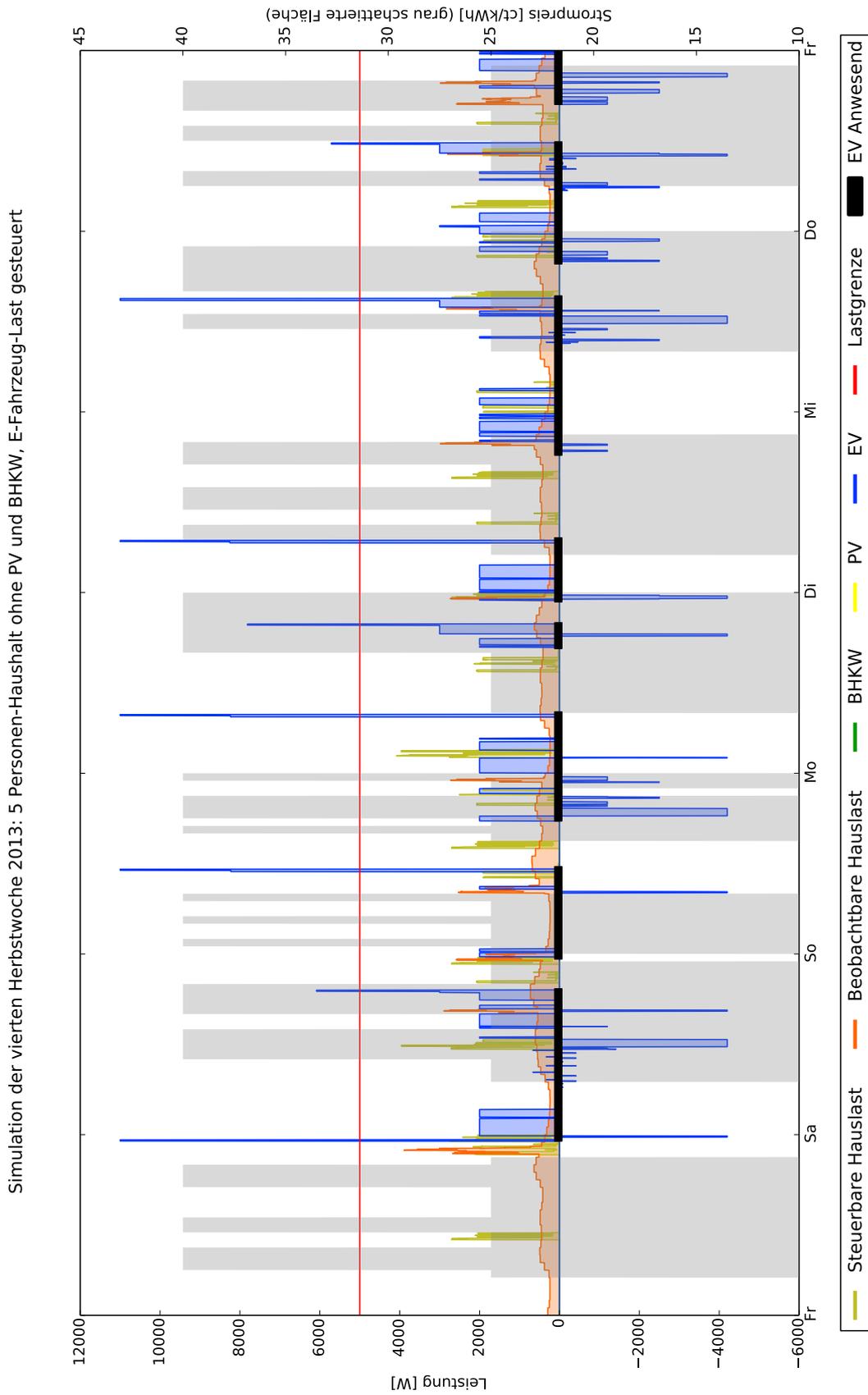


Abbildung 6.12: Simulation E (Herbst, 5 Personen, ohne PV/BHKW, EV-Last gesteuert)

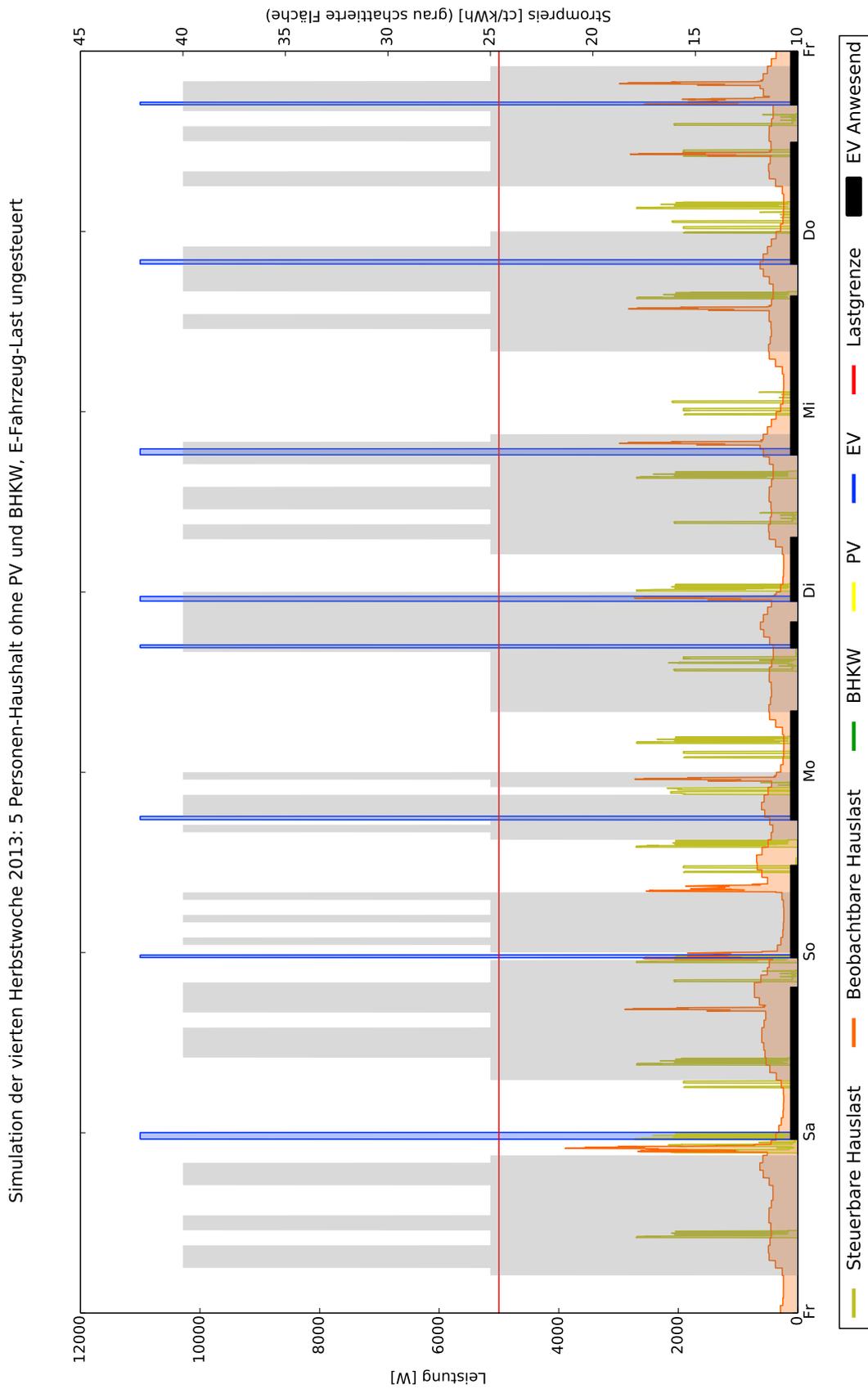


Abbildung 6.13: Simulation F (Herbst, 5 Personen, ohne PV/BHKW, EV-Last ungesteuert)

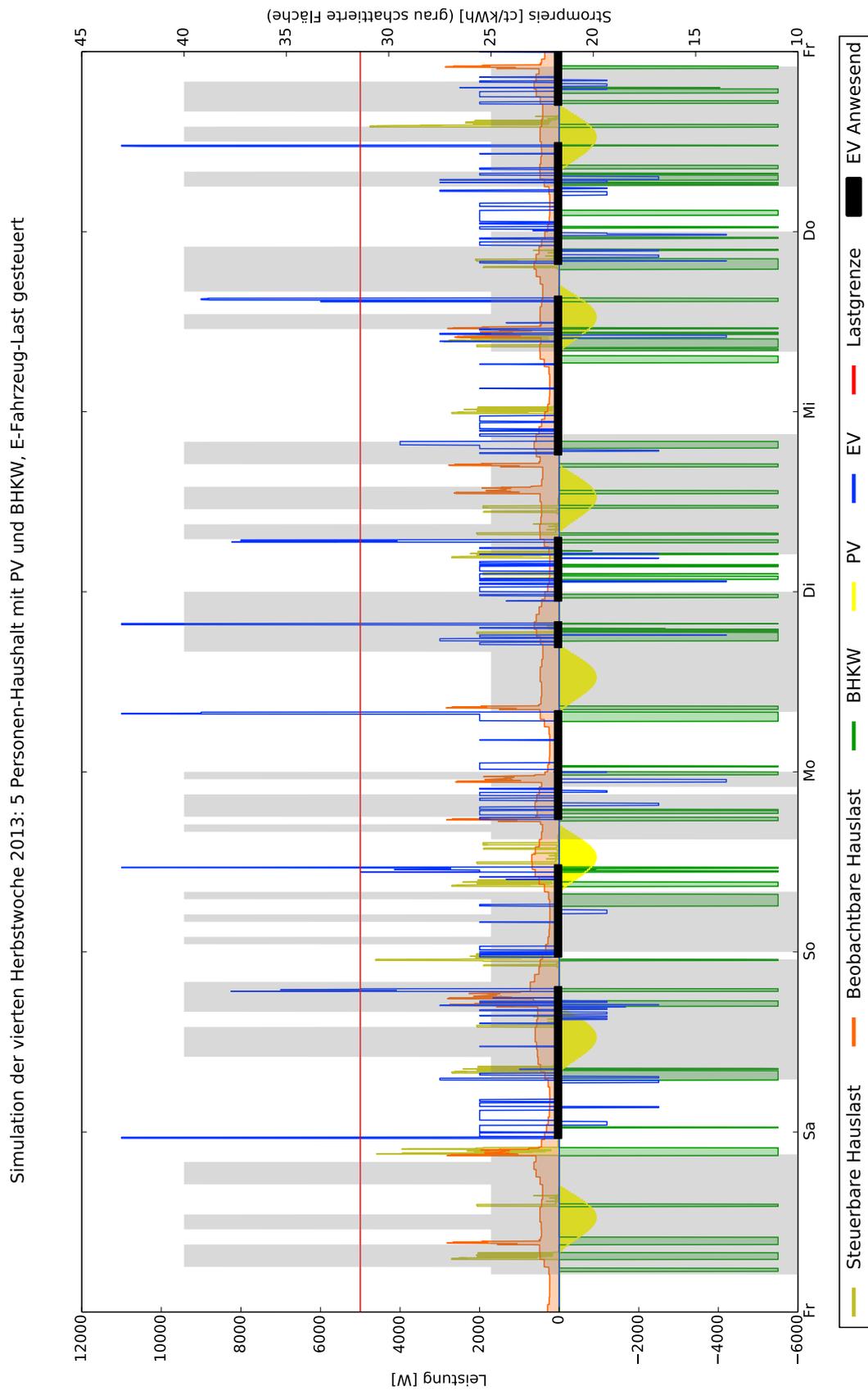


Abbildung 6.14: Simulation G (Herbst, 5 Personen, mit PV/BHKW, EV-Last gesteuert)



### 6.2.3 Auswertung der realen Wohnphase im Frühjahr 2014

Im Frühjahr 2014 wurde erneut eine Wohnphase mit zwei Probanden durchgeführt, wobei es sich in diesem Fall um zwei junge berufstätige Frauen handelte. Die Energiemanagement-Software, welche hierbei zum Einsatz kam, konnte im Gegensatz zur Herbst-Wohnphase die Lade- und Rückspeisephasen des Elektrofahrzeugs flexibel im Rahmen der gegebenen Restriktionen steuern. Tabelle 6.9 listet die Ankunfts- und Abfahrtszeiten am Smart Home, die Ladezustände der Batterie zum jeweiligen Ankunftszeitpunkt sowie die jeweils im E-Fahrzeug eingestellte maximale Ladeleistung.

Tabelle 6.9: Standzeiten am Smart Home sowie energierelevante Daten des Elektrofahrzeugs in Woche 2 der Frühjahrswohnphase

Präsenz ESHL	Start-SOC	Max. Ladeleistung [kW]
– Mo 26.05.14 07:54	–	11
Mo 20:54 – Di 07:48	57	4
Di 18:22 – Mi 08:10	66	3
Mi 20:12 – Do 12:02	48	2
Do 12:12 – Fr 07:36	65	2
Fr 17:32 – Fr 20:52	51	2
Fr 22:11 – Sa 08:01	39	2
Mo 20:17	47	2

Wie aus diesen Daten ersichtlich wird, wurde die im Fahrzeug eingestellte Mindestreichweite von 30 % bei Ankunft nie unterschritten, weshalb in Abbildung 6.16 zur Ankunftszeit auch keine Ladevorgänge mit der jeweils maximalen Ladeleistung zu verzeichnen sind. Da sich die vorgegebene Lastgrenze – zumindest in dieser beispielhaften Woche – sukzessive von Tag zu Tag reduzierte, wurde von den Hausbewohnerinnen und gleichzeitig Fahrerinnen des E-Fahrzeugs die maximal mögliche Ladeleistung über die Benutzungsschnittstelle im Fahrzeug ebenfalls reduziert.

Die Ladevorgänge fanden erneut fast ausschließlich außerhalb der teuersten Zeitintervalle statt. Überraschend hingegen ist die Tatsache, dass im Prinzip keine Rückspeisevorgänge zu verzeichnen sind. Der Optimierungsrahmen – also der Optimierungsalgorithmus an sich, die Kodierung des Genotyps für das Elektrofahrzeug samt Gewichtungsfaktoren für Lade- und Rückspeiseaktionen, die Ankunfts- und Abfahrtszeiten sowie Strompreis- und Lastbegrenzungssignal – für die reale Wohnphase als auch die in Anhang A aufgeführten Simulationen I bis P ist identisch. Dennoch weisen die Simulationen im Gegensatz zum realen Wohnszenario vereinzelt Rückspeisevorgänge auf. Dies zeigt, dass es schwierig ist, geeignete Gewichtungsfaktoren – sprich Kosten für das Laden und Rückspeisen – festzulegen, die für sehr unterschiedliche Konstellationen stets sehr gute Ergebnisse liefern. Es ist nicht ganz ersichtlich, weshalb in dieser Woche keine Rückspeisevorgänge durchgeführt wurden. Auch das BHKW lieferte nicht stets zu den Zeiten elektrische Energie, zu denen die steuerbaren Haushaltsgeräte Last erzeugten.

Tabelle 6.10 listet analog zur Tabelle 6.7 die Stromkosten aller simulierten Wochenlastgänge im Frühjahr auf.

Würde man die extreme Verteuerung der Stromkosten bei Überschreitung der Lastbegrenzungskurve erneut außer Acht lassen, so würden sich die Stromkosten auf die Beträge laut Tabelle 6.11 belaufen:

Tabelle 6.10: Stromkosten aller simulierten Wochenlastgänge im Frühjahr (inkl. Strafkosten für Lastgrenzenüberschreitung)

<b>Simulation</b>	<b>Kosten [€]</b>	<b>Simulation</b>	<b>Kosten [€]</b>
Simulation I	43,78	Simulation J	52,63
Simulation K	10,51	Simulation L	24,15
Simulation M	51,90	Simulation N	63,49
Simulation O	11,29	Simulation P	26,69

Tabelle 6.11: Stromkosten aller simulierten Wochenlastgänge im Frühjahr (keine Strafkosten für Lastgrenzenüberschreitung)

<b>Simulation</b>	<b>Kosten [€]</b>	<b>Simulation</b>	<b>Kosten [€]</b>
Simulation I	26,46	Simulation J	21,94
Simulation K	5,17	Simulation L	5,64
Simulation M	37,73	Simulation N	31,72
Simulation O	6,70	Simulation P	6,83

Unter dem Gesichtspunkt einer größtmöglichen Korrelation zwischen erzeugter Haushaltslast und eingespeister elektrischer Energie bietet der bisher eingesetzte Optimierungsalgorithmus sowie die Kodierung des Genotyps für das Elektrofahrzeug (und auch das BHKW) Potential für Verbesserungen. Betrachtet man die Kosten für die Frühjahrswohnphase gemäß Tabelle 6.10 so wird jedoch deutlich, dass ein gesteuertes Lastprofil für das Elektrofahrzeug in allen simulierten Konstellationen, welche einen Straffaktor für das Überschreiten der Lastgrenze berücksichtigen, einen erheblichen Kostenvorteil mit sich bringt. Selbiges Fazit ergibt sich auch für die Simulationen der Herbstwohnphase. Tabelle 6.11 zufolge, welche wiederum die Kosten ohne Berücksichtigung eines Straffaktors für das Überschreiten der Lastgrenze widerspiegelt, scheint dieser Kostenvorteil nicht gegeben. Dies offenbart das Verbesserungspotential hinsichtlich der Architektur des Energiemanagement-Systems: Das Teilproblem selbst kann bei der Evaluation eines gerätespezifischen Lastprofils nicht auf das aktuell gültige zeitvariable Strompreis- bzw. Lastbegrenzungssignal zugreifen. Jedoch könnte auf diese Weise ein kostengünstigeres Lastprofil gewährleistet werden, indem nicht pauschal mit voller Leistung kurz vor Abfahrt, sondern bei Bedarf über einen längeren Zeitraum mit geringerer Leistung geladen wird, um einen Ladezustand von 100 % zu erreichen. Im Falle der Simulationen aus Tabelle 6.11 korrelierte der jeweilige Abfahrtszeitpunkt recht häufig mit einem teuren Preissignal.

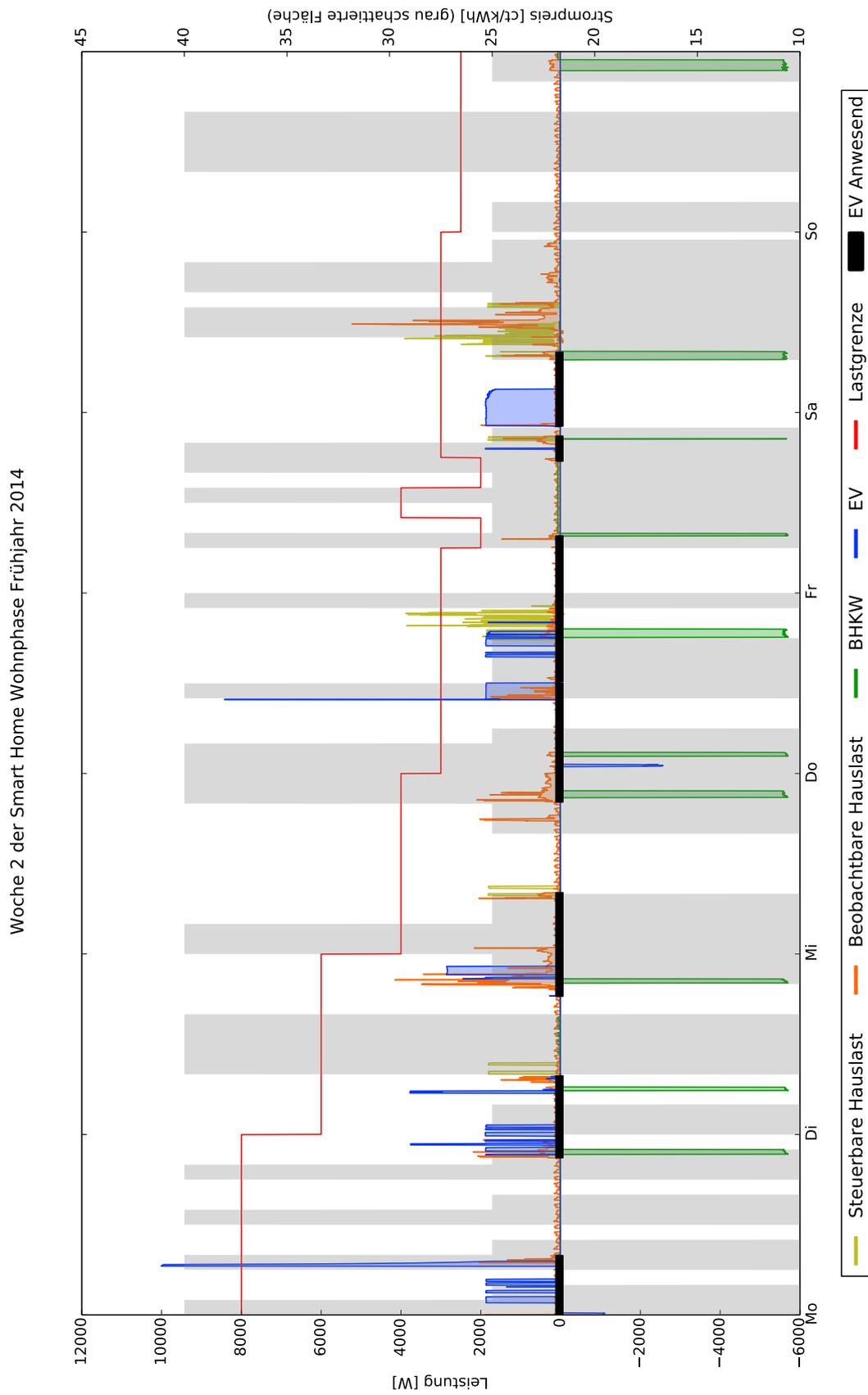


Abbildung 6.16: Auswertung der 2. Woche der Wohnphase im Frühjahr 2014

Abschließend wird in Abschnitt 7.1 ein zusammenfassender Überblick über die Kernaspekte dieser Arbeit präsentiert, bevor in Abschnitt 7.2 dem Leser potentiell anknüpfende Forschungstätigkeiten aufgezeigt werden.

### 7.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Potential einer vorteilhaften kommunikationstechnischen Einbindung von Elektrofahrzeugen in das Smart Grid, einem in der Entstehung befindlichen kommunikationstechnisch intelligent vernetzten Energienetz. Hierbei werden im Speziellen die folgenden drei Aspekte beleuchtet:

1. Die digitale Kommunikation zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation zum Zwecke eines gesteuerten Lade- bzw. Rückspeisevorgangs, die auf dem standardisierten Protokoll ISO/IEC 15118 basiert
2. Die Integration dieses Protokolls in ein spezielles Energiemanagement-System eines Haushalts, auf Basis dessen sich das Elektrofahrzeug als flexibler Verbraucher und Energiespeicher nutzen lässt
3. Die Beschreibung eines E-Roaming-Verfahrens zur anbieter- und länderübergreifenden Nutzung von Ladeinfrastruktur mittels diverser, teils standardisierter Kommunikationsschnittstellen

Im Rahmen des ersten Aspekts wurde ein Auszug aus der aktuellen Normungslandschaft präsentiert, welcher alle relevanten, für das Verständnis dieser Arbeit notwendigen Standardisierungsinitiativen auf Hard- und Softwareseite präsentiert. Dieses normungstechnische Hintergrundwissen dient im Zusammenhang mit der im ersten Kapitel motivierten Zielsetzung, das Elektrofahrzeug als flexiblen Verbraucher und Energiespeicher in das Energienetz einzubinden, als wichtige Voraussetzung, um dem Leser die Notwendigkeit des digitalen Kommunikationsprotokolls ISO/IEC 15118 schlüssig darzulegen. Diese Norm befindet sich in Teilen noch im Standardisierungsprozess und spiegelt den Konsens gleich drei verschiedener Industriezweige – Automobilhersteller, Ladeinfrastrukturbetreiber sowie die Vertreter der Energiewirtschaft – wider. Mittels dieser Kommunikationsschnittstelle ist es erstmals

möglich, energierelevante Mehrwertinformationen zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation sowie daran angebundener Systeme zu übertragen und somit einen planbaren, gesteuerten Ladevorgang zu realisieren, welcher Lasten im Stromnetz geeignet verschieben, die regenerativ verfügbare Energie besser ausnutzen und somit auch Stromkosten senken lässt. Insbesondere können durch eine effizientere Ausnutzung der verfügbaren Ressourcen und dem besseren Einklang von Erzeugung und Verbrauch hohe Kosten für den Netzausbau vermieden bzw. reduziert werden.

Das ISO/IEC 15118 Protokoll wurde darüber hinaus anhand der fünf Kriterien Akzeptanz, Erweiterbarkeit, Sicherheit, Effizienz und Komplexität evaluiert, um dem Leser eine aussagekräftige Bewertung der Zukunftsfähigkeit dieser Norm präsentieren zu können.

Um das ISO/IEC 15118 Protokoll sowie die angesprochenen Potentiale nicht nur theoretisch zu betrachten, wurde ein Prototyp dieses Protokolls implementiert und in einem realen Umfeld getestet, der sich auf den zweiten angesprochenen Aspekt bezieht. Diese reale Evaluationsumgebung besteht aus einem Prototypen eines intelligenten Haushalts mit beobachtbaren und steuerbaren Haushaltskomponenten – dem Energy Smart Home Lab (ESHL) –, welches sich mit einer Grundfläche von 60 m<sup>2</sup> und einer Aufteilung in eine gemütliche Wohnküche sowie zwei Schlafzimmer als geeignetes Umfeld für Wohnphasen mit Probanden präsentiert. Über eine an das ESHL angebrachte Ladestation ist das Elektrofahrzeug in der Lage, mit dem Energiemanagement-System energierelevante Mehrwertinformationen wie bspw. benötigte Energiemenge, zur Rückspeisung zur Verfügung stehende Energiemenge und geplanter Abfahrtszeitpunkt auszutauschen. Hierfür wurde ein sogenannter Treiber entwickelt, welcher die ladestationsseitige Kommunikationsschnittstelle des ISO/IEC 15118 Protokolls adaptiert und die Mehrwertinformationen in Datenobjekte übersetzt, die mit dem Energiemanagement-System ausgetauscht werden können. Gemäß der Architektur dieses Energiemanagement-Systems, welches auf den Prinzipien des Organic Computing basiert, wurde darüber hinaus eine sogenannte Observerkomponente zum Sammeln und Verarbeiten der Zustandsinformationen des Elektrofahrzeugs sowie eine Controllerkomponente zur steuernden Einwirkung auf den Lade- und Rückspeisevorgang entwickelt.

Einen wesentlichen Teil dieser Arbeit macht die Kodierung der bereits angesprochenen und weiterer energierelevanter Mehrwertinformationen zur geeigneten Verarbeitung durch den Optimierungsalgorithmus, welcher auf einem evolutionären Verfahren basiert, aus. Im Vergleich zu den diversen, im ESHL befindlichen steuerbaren Haushaltsgeräten wie Waschmaschine, Trockner und Geschirrspülmaschine stellt die Berechnung eines kostenminimalen Lastprofils für das Elektrofahrzeug ein deutlich schwierigeres Optimierungsproblem dar. Dies ist dadurch begründet, dass ein Ladevorgang keinen atomaren Ausführungsblock darstellt, wie es etwa bei der Waschmaschine der Fall ist, sondern aufgrund der diversen Lade- und sogar Rückspeisestufen sowie der Möglichkeit, das Lastprofil recht feingranular zu gestalten, sich eine Vielzahl an möglichen Lösungen ergeben, aus denen unter zeitlicher und rechenkapazitätsbedingter Restriktionen ein nahezu optimales sowie gültiges Lastprofil berechnet werden muss. Als gültiges Lastprofil das Elektrofahrzeug betreffend ist ein Lastprofil zu verstehen, welches sämtliche harten Restriktionen, gegeben durch technische Spezifika bzgl. der Batterie oder durch Benutzervorgaben, nicht verletzt.

Im Rahmen diverser durchgeführter Simulationen konnte gezeigt werden, dass das erarbeitete Konzept – gemeint ist die kommunikationstechnische Einbindung des Elektrofahrzeugs in das Energiemanagement anhand der besprochenen Komponenten und des Kodierungsschemas – die Stromkosten in einem 2- bzw. 5-Personenhaushalt im Vergleich zu einem ungesteuerten

Ladevorgang erheblich senken kann. Dies setzt allerdings voraus, dass externe Anreizsignale, die die aktuelle Netzsituation in geeigneter Weise abbilden, vom Energieanbieter an ein solches Energiemanagement-System kommuniziert werden. Diese Signale können zeitvariable Preissignale mit signifikanter preislicher Spreizung, Lastbegrenzungssignale oder gar eine Kombination dieser beiden sein.

Der dritte und letzte große Aspekt dieser Arbeit beschäftigt sich damit, wie ein benutzerfreundliches E-Roaming-Verfahren realisiert werden kann, welches es dem Elektromobilisten erlaubt, unabhängig von seinem Stromliefervertrag die Batterie seines Elektrofahrzeugs anbieter- und länderübergreifend an öffentlicher Ladeinfrastruktur aufzuladen. Hierbei liegt der Fokus wiederum auf den technischen Schnittstellen, insbesondere werden die Voraussetzungen, die hierfür bereits im ISO/IEC 15118 Protokoll geschaffen wurden, sowie das für einen E-Roaming-Marktplatz ausgelegte Open InterCharge Protokoll analysiert und die zusammenhängende Funktionsweise erläutert. Dieser Aspekt erscheint etwas losgelöst von den restlichen Kapiteln, beleuchtet jedoch im Gegensatz zum Smart Home Szenario einen eher makroskopischen Aspekt der Elektromobilität und rundet somit die betrachtete Thematik ab.

## 7.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde speziell das erste der drei in Abschnitt 1.1 vorgestellten Integrationsszenarien untersucht, in welchem die Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch als ein wichtiger Baustein der Energiewende gesehen wird. Die beiden anderen Szenarien, deren Fokus einerseits auf der Realisierung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung und andererseits auf der Erbringung von Netzdienstleistungen für die Netz- und Spannungsqualität liegt, wurden hingegen nicht näher betrachtet. Die existierende Test- und Evaluationsumgebung – bisher repräsentiert durch das Smart Home (ESHL) – könnte mittels eines sogenannten 4-Quadrantenstellers erweitert werden, um eine “hardware-in-the-loop” Testumgebung zu realisieren. Mit Hilfe eines solchen 4-Quadrantenstellers können unterschiedlichste Netzzustände, wie bspw. Überlastsituationen, große Spannungsbandschwankungen oder Kurzschlüsse, für das Smart Home emuliert und somit die Echtzeitfähigkeit des Elektrofahrzeugs auf die Probe gestellt werden. Hierbei würden Verbrauchs- und Einspeisewerte des Smart Home messtechnisch erfasst und einer Netzsimulationssoftware als Eingangsgrößen übergeben werden. Diese Software könnte dann gemäß der zu simulierenden Netzsituation die entsprechenden Spannungskurven für den Netzwerkknoten, an welchem das Smart Home angeschlossen ist, errechnen und demzufolge die Parameter für den 4-Quadrantensteller bereitstellen. Der 4-Quadrantensteller wiederum würde die gewünschte Netzsituation am Hausanschlusspunkt des Smart Home generieren.

Solche Szenarien könnten dann mittels zweier Methoden untersucht werden:

1. Das Elektrofahrzeug ist mit einer Komponente zur Netzüberwachung ausgestattet und weist selbständig den fahrzeuginternen Ladestromrichter dazu an, bspw. Oberschwingungs- und Verzerrungsblindleistung durch Verschiebung des Blindleistungsfaktors ( $\cos \Phi$ ) zu kompensieren. Durch eine Korrektur des Verhältnisses zwischen Scheinleistung und Wirkleistung am Ladestromrichter können Spannungsschwankungen lokal ausgeglichen werden.
2. Das Elektrofahrzeug ist nicht mit einer solchen Netzüberwachungskomponente ausgestattet, erhält jedoch über das ISO/IEC 15118 Protokoll die zusätzliche Information,

welchen Blindleistungsfaktor es am Ladestromrichter einzustellen hat. Hierfür müsste von einer externen Entität – bspw. dem Netzbetreiber – ein entsprechendes Signal an das Energiemanagement-System des Smart Home gesendet werden. In Abschnitt 6.1.2 wurde bereits erläutert, wie eine standardkonforme Erweiterung des Protokolls um einen Parameter wie diesen umgesetzt werden kann.

In einem zweiten Schritt wäre es von Vorteil, den globalen Optimierer zu modifizieren. Dieser könnte bspw. dahingehend verändert werden, dass man zwar das Optimierungsverfahren auf Basis eines evolutionären Algorithmus beibehält, jedoch die mögliche Struktur des Genotyps verändert, sodass dieser nicht nur in Form eines Bitvektors, sondern auch als gemischt ganzzahliges Individuum kodiert werden kann. Dies könnte unter Umständen das Lastprofil des Elektrofahrzeugs dahingehend besser gestalten, dass eine höhere Korrelation zwischen steuerbarer Hauslast und Einspeiseverhalten des E-Fahrzeugs erwirkt wird und die Stromkosten dadurch weiter gesenkt werden.

Des Weiteren kann gemäß der aktuellen Architektur des globalen Optimierers das Teilproblem selbst bei der Evaluation eines gerätespezifischen Lastprofils nicht auf das aktuell gültige zeitvariable Strompreis- bzw. Lastbegrenzungssignal zugreifen. Wie in Abschnitt 6.2.2, Seite 128 bereits erwähnt, könnte auf diese Weise jedoch ein kostengünstigeres Lastprofil gewährleistet werden, indem nicht pauschal mit voller Leistung kurz vor Abfahrt, sondern bei Bedarf über einen längeren Zeitraum mit geringerer Leistung geladen wird, um einen Ladezustand von 100 % zu erreichen.

In einer Studie zu “Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge” des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung [75] wurde ein interessantes ökonomisches Potential für gewerbliche Flotten identifiziert, die bereits 30 % des E-Fahrzeug-Neuwagenmarktes ausmachen. Die momentan noch gegenüber vergleichbaren Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor höheren Anschaffungskosten für Elektrofahrzeuge sind einerseits in den Kosten für die Traktionsbatterie<sup>1</sup> und andererseits in den Kosten für den (teils hybriden) Antriebsstrang begründet. Hingegen sind die laufenden Kosten gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor um ein Vielfaches geringer, da zum Einen die Stromkosten für die Zurücklegung derselben Strecke nur einen Bruchteil der Kraftstoffpreise ausmachen und zum Anderen geringere Wartungskosten zu erwarten sind (weniger mechanische Bauteile, kein Ölwechsel nötig, etc.). Gerade vor diesem Hintergrund erscheint der Einsatz von Elektrofahrzeugen in gewerblichen Fuhrparks besonders sinnvoll. Je mehr Strecken diese Fahrzeuge zurücklegen, umso schneller amortisieren sich die höheren Investitionskosten.

Zudem ist gerade in firmeninternen Fuhrparks eine hohe Planbarkeit für die zurückzulegenden Strecken gegeben, da über das Fuhrparkmanagementsystem die zweckgebundenen Reservierungen (Geschäftstermin, Warenauslieferung, etc.) der Elektrofahrzeuge erfasst und somit entsprechend optimierte Ladefahrpläne für die einzelnen Ladestationen auf dem Firmengelände berechnet werden können. Somit kann nicht nur dafür gesorgt werden, dass die einzelnen Elektrofahrzeuge rechtzeitig den jeweils nötigen Ladezustand aufweisen, sondern auch die Stromkosten gesenkt werden. Der Grundpreis für den Stromtarif Gewerbetreibender wird nämlich an der höchsten Leistungsabnahme über das gesamte Jahr gesehen bemessen, was eine zeitliche Koordinierung der Ladevorgänge untereinander und mit evtl. weiteren Energieverbrauchern erforderlich macht, um die Kosten niedrig zu halten. Die Orchestrierung

---

<sup>1</sup>Die Kosten für Lithium-Ionen Batterien sind in den letzten Jahren über die Erwartung hinaus stark gesunken, sodass die Batterie möglicherweise innerhalb von einem oder zwei Jahren kein Kostenargument mehr darstellen müsste.

der Energieflüsse in einem elektrifizierten Fuhrpark stellt daher ein weiteres, über den Smart Home-Anwendungsfall hinausgehendes und sehr spannendes Energiemanagement-Szenario dar.

Die Firma Dataforce erhebt in Zusammenarbeit mit dem Kraftfahrtbundesamt regelmäßig Statistiken zum elektromobilen Fahrzeugbestand in deutschen Fuhrparks. Aus diesen Statistiken heraus ließe sich, zusammen mit Zusatzinformationen über die installierte Ladeinfrastruktur des jeweiligen Fuhrparks, eine Bedarfsanalyse für ein Lademanagement ableiten.

Abschließend bleibt zu sagen, dass der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Prototyp des ISO/IEC 15118 Protokolls zwar nicht alle Aspekte der Norm widerspiegelt – auf die Implementierung der Sicherheitsmechanismen wie TLS wurde bspw. verzichtet – aber der existierende Code einer standardkonformen Implementierung entspricht. Die Schnittstelle zum Energiemanagement-System des Smart Home (der Treiber) lässt sich mit minimalem Aufwand für beliebig andere Energiemanagement-Systeme anpassen. Somit ist eine Verwertung der bestehenden Arbeit über den akademischen Horizont hinaus gewährleistet.



# ANHANG A

---

## SIMULATIONSERGEBNISSE WOHNPHASE FRÜHJAHR 2014

In diesem Anhang sind die Simulationsläufe I bis P, welche jeweils der in Abschnitt 6.2.3 ausgewerteten Woche der Wohnphase im Frühjahr 2014 entsprechen, enthalten.

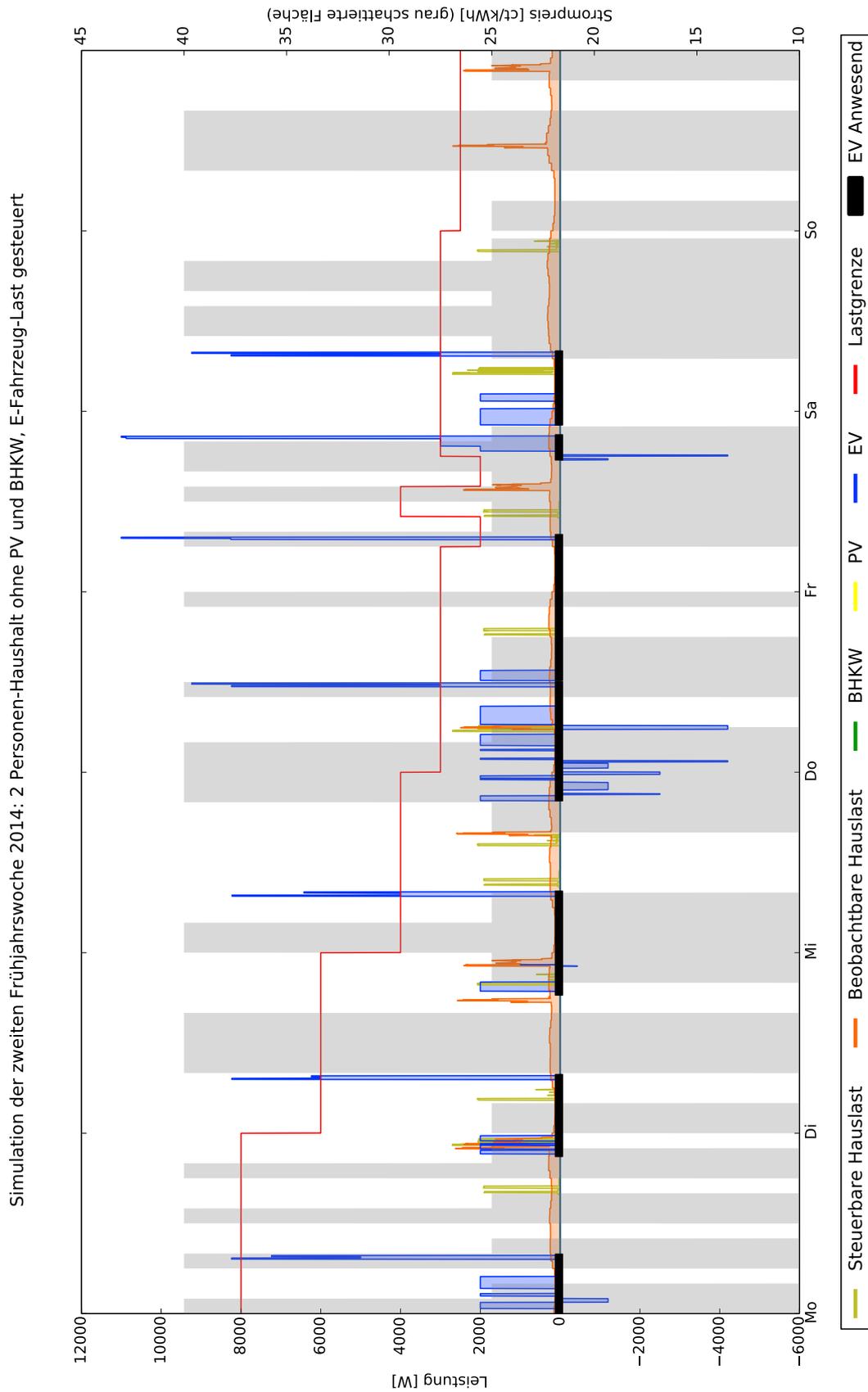


Abbildung A.1: Simulation I (Frühjahr, 2 Personen, ohne PV/BHKW, EV-Last gesteuert)

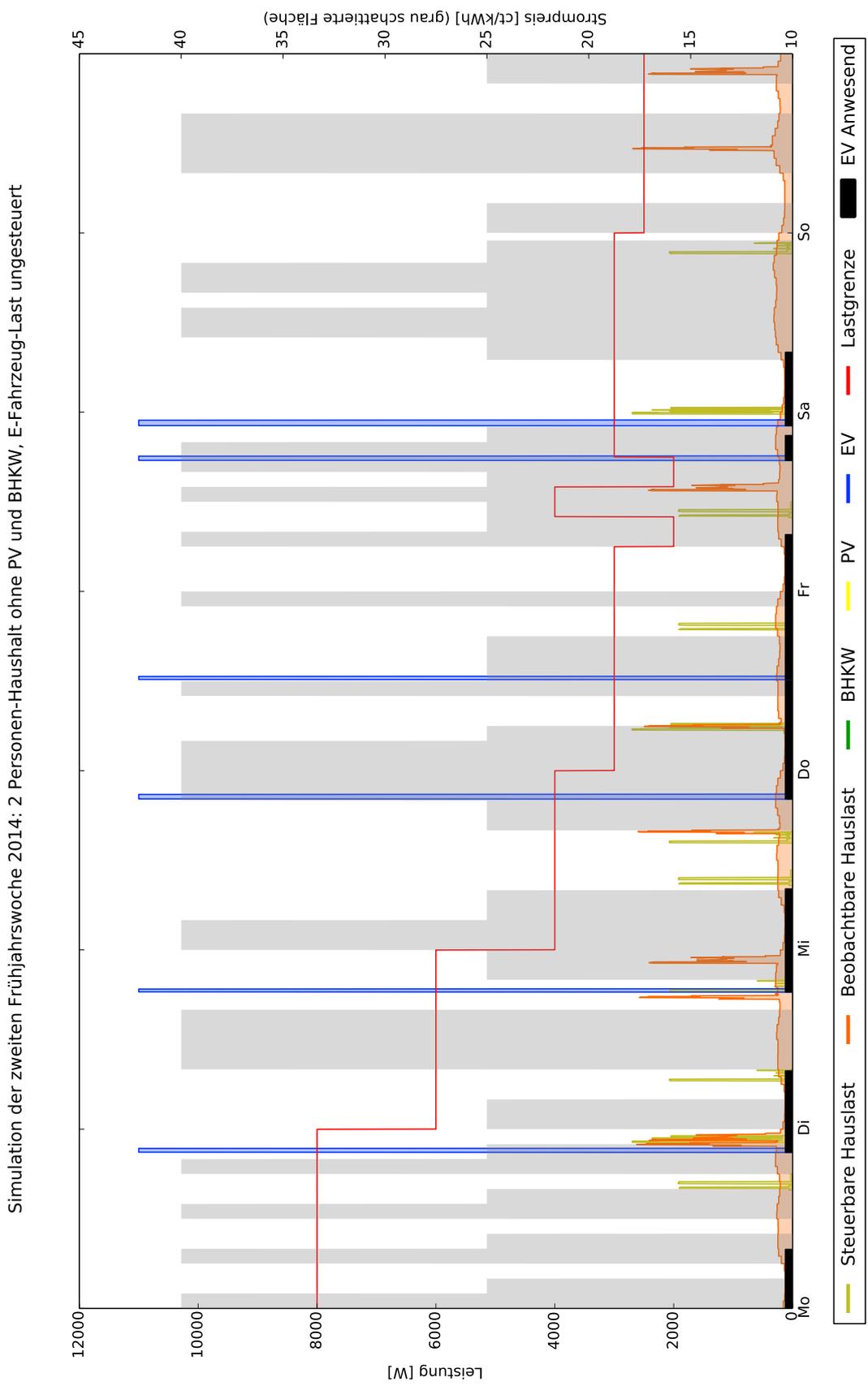


Abbildung A.2: Simulation J (Frühjahr, 2 Personen, ohne PV/BHKW, EV-Last ungesteuert)

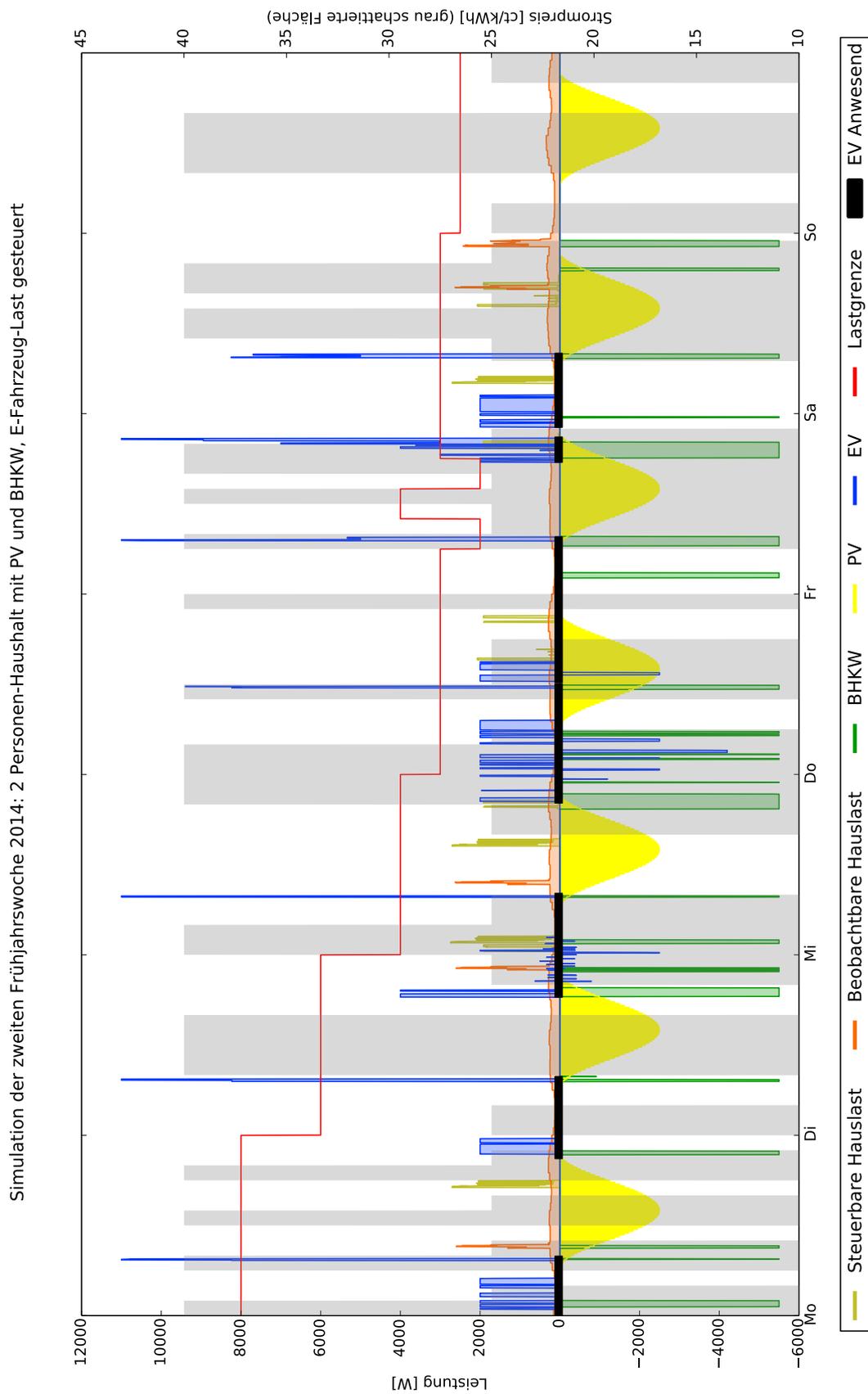


Abbildung A.3: Simulation K (Frühjahr, 2 Personen, mit PV/BHKW, EV-Last gesteuert)

Simulation der zweiten Frühjahrswoche 2014: 2 Personen-Haushalt mit PV und BHKW, E-Fahrzeug-Last ungesteuert

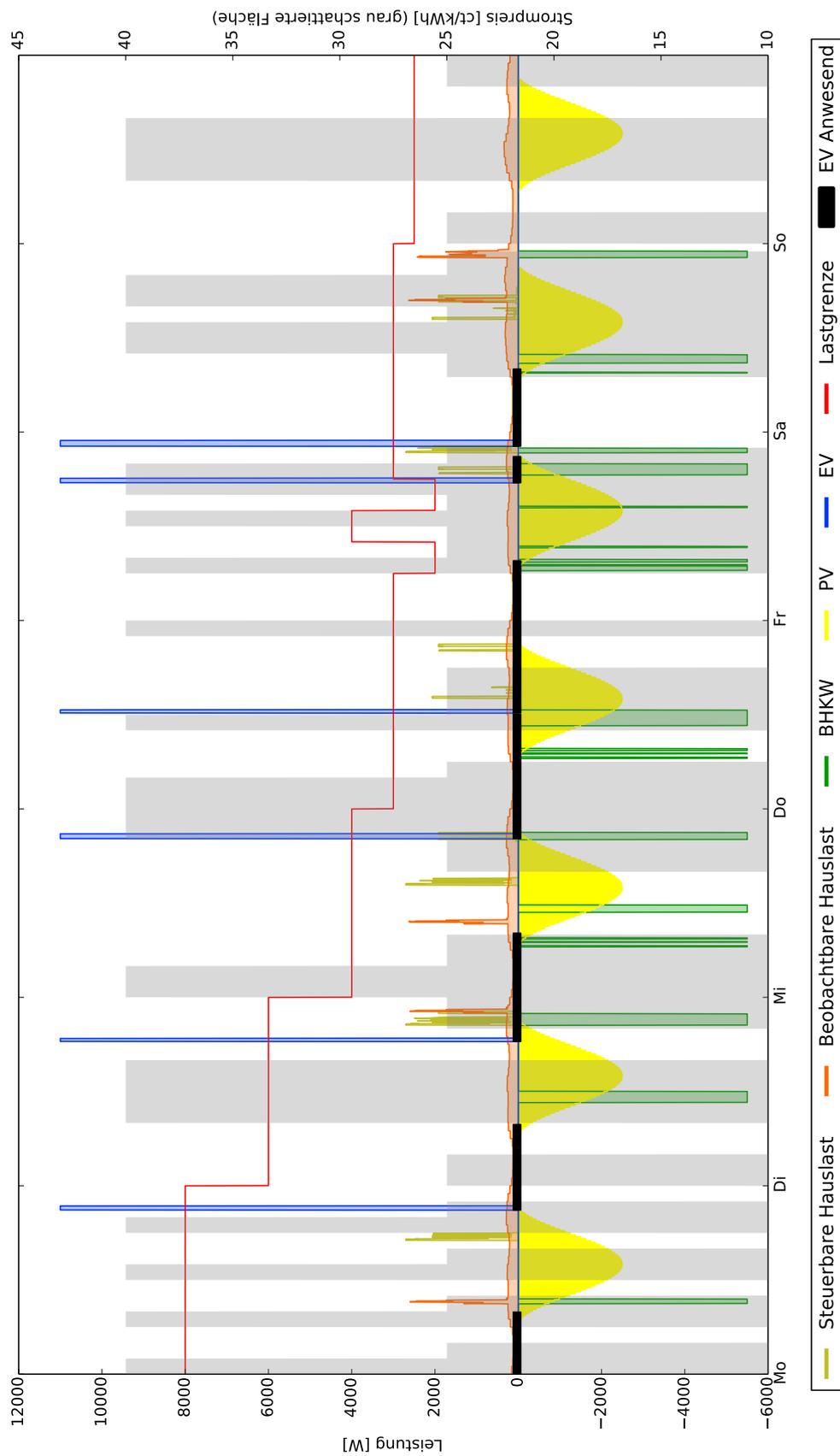


Abbildung A.4: Simulation L (Frühjahr, 2 Personen, mit PV/BHKW, EV-Last ungesteuert)

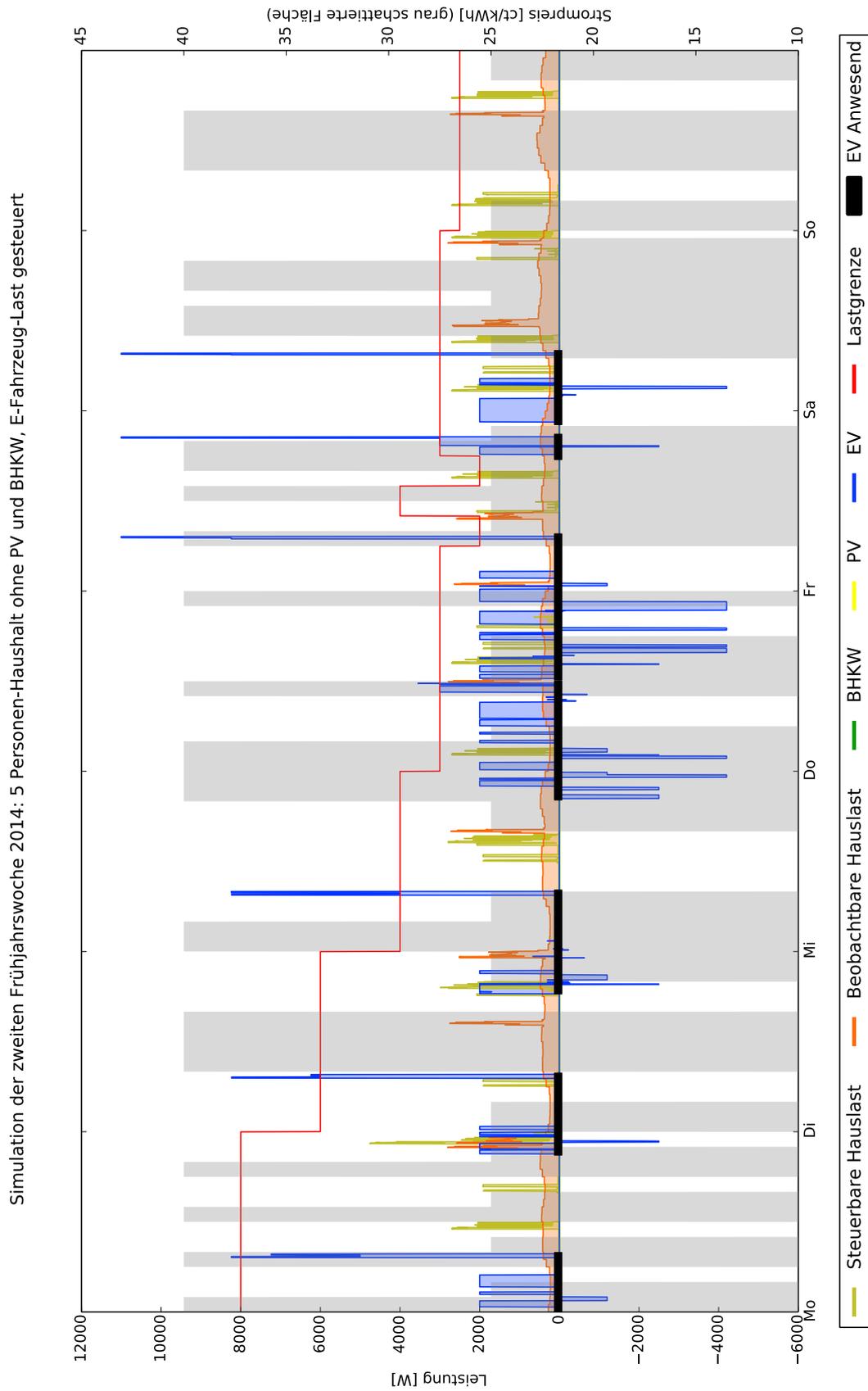


Abbildung A.5: Simulation M (Frühjahr, 5 Personen, ohne PV/BHKW, EV-Last gesteuert)

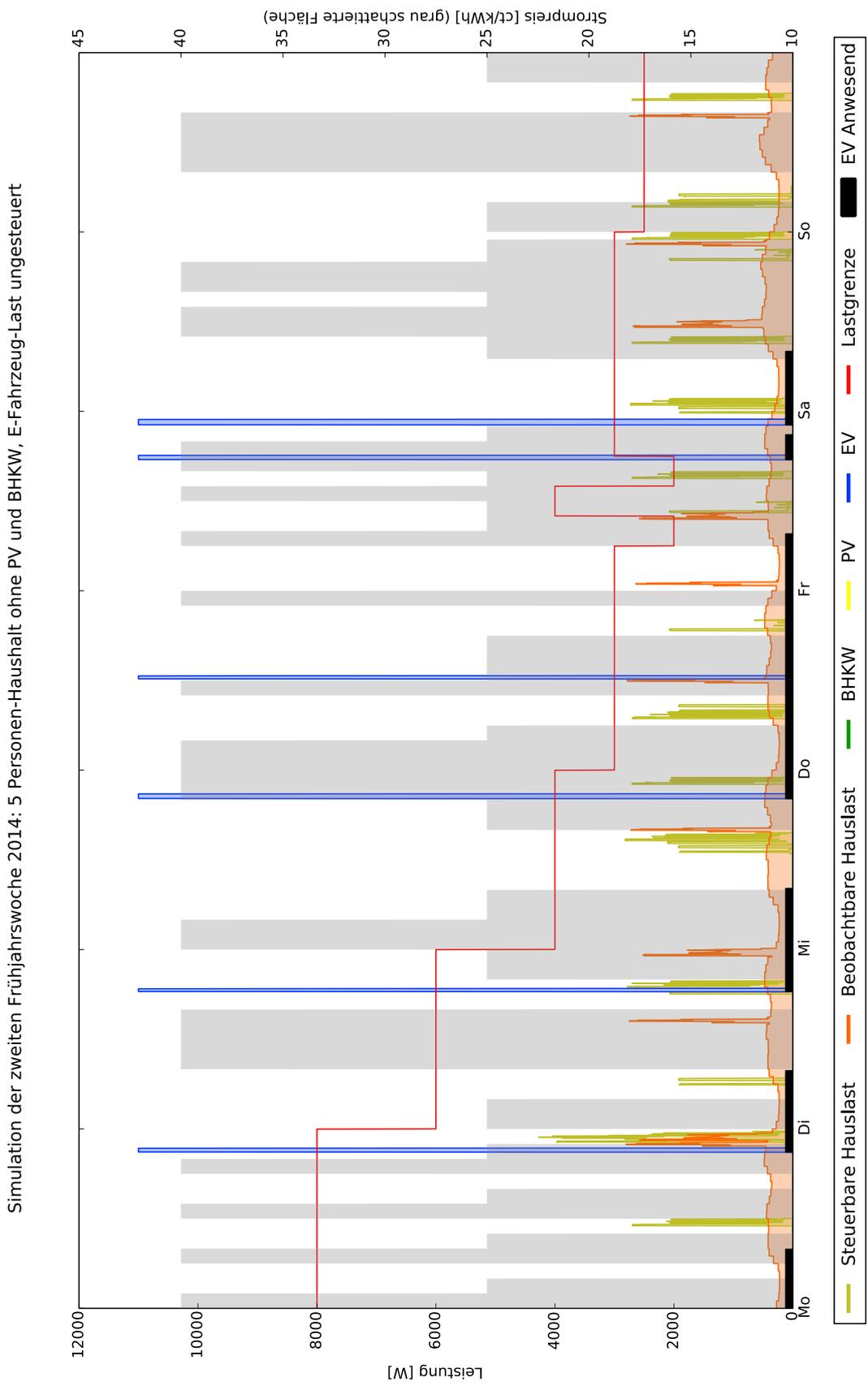


Abbildung A.6: Simulation N (Frühjahr, 5 Personen, ohne PV/BHKW, EV-Last ungesteuert)

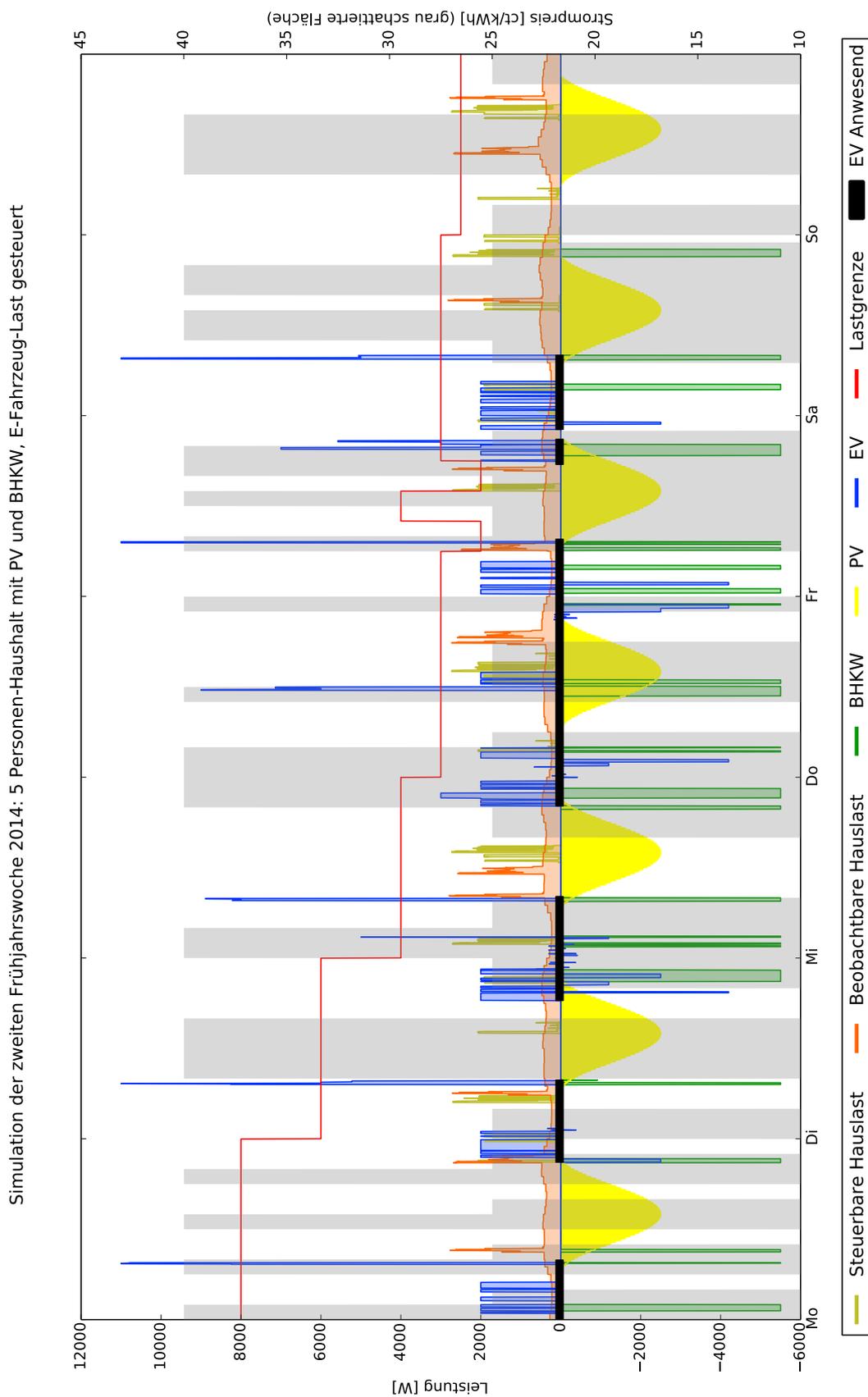


Abbildung A.7: Simulation O (Frühjahr, 5 Personen, mit PV/BHKW, EV-Last gesteuert)

Simulation der zweiten Frühjahrswoche 2014: 5 Personen-Haushalt mit PV und BHKW, E-Fahrzeug-Last ungesteuert

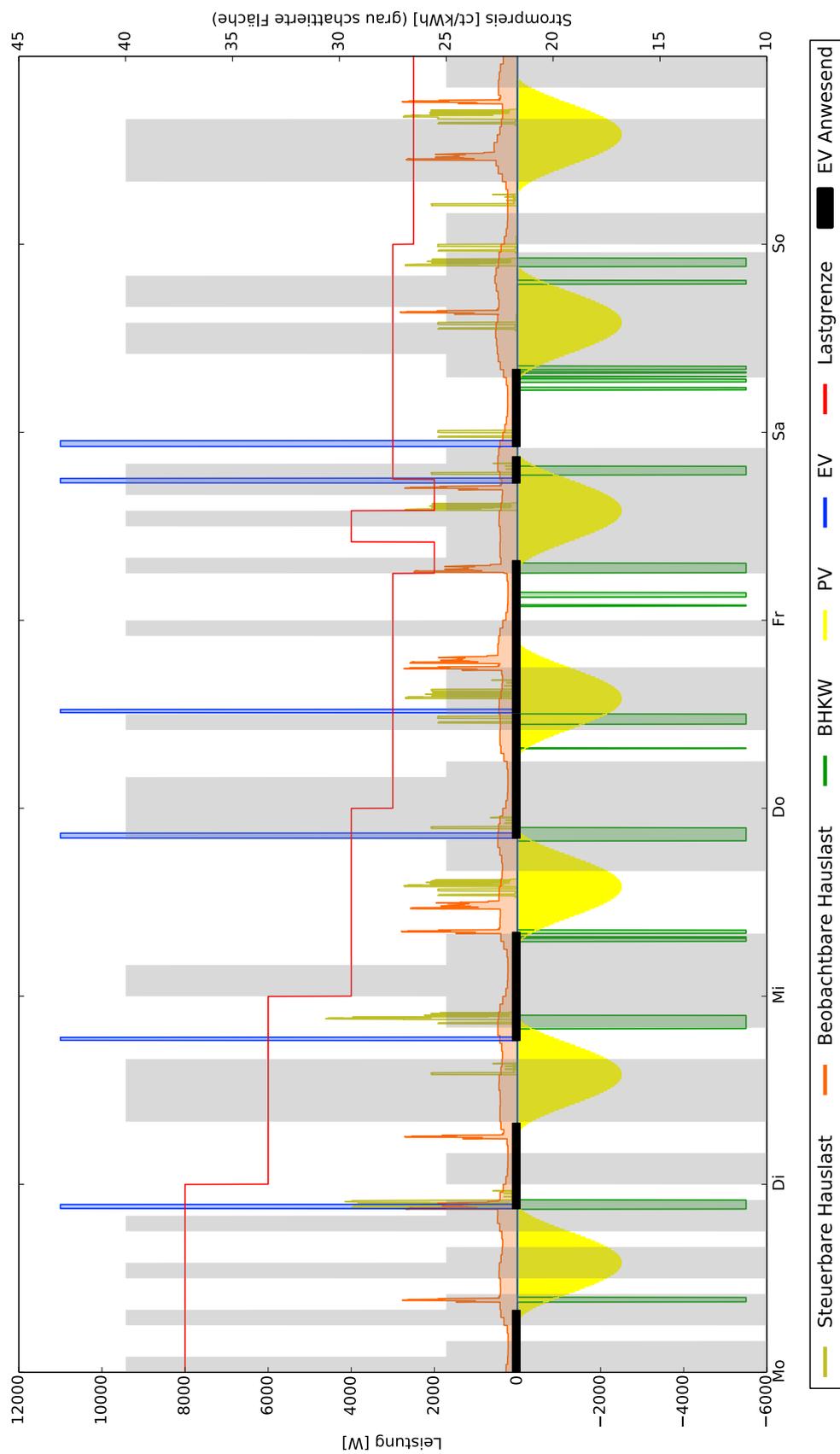


Abbildung A.8: Simulation P (Frühjahr, 5 Personen, mit PV/BHKW, EV-Last ungesteuert)



- [1] IEC 62196: *Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckvorrichtungen und Fahrzeugstecker - Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen*. 2010
- [2] ACEA - EUROPEAN AUTOMOBILE MANUFACTURERS' ASSOCIATION: *ACEA position and recommendations for the standardization of the charging of electrically chargeable vehicles*. [http://www.acea.be/uploads/publications/Updated\\_ACEA\\_position\\_on\\_charging\\_ECVs.pdf](http://www.acea.be/uploads/publications/Updated_ACEA_position_on_charging_ECVs.pdf), Mai 2012. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [3] ALLERDING, F. : *Organic Smart Home - Energiemanagement für Intelligente Gebäude*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2013
- [4] ALLERDING, F. ; MAUSER, I. ; SCHMECK, H. : Customizable Energy Management in Smart Buildings using Evolutionary Algorithms. In: *Proceedings der EvoStar 2014*, 2014
- [5] ALLERDING, F. ; PREMM, M. ; SHUKLA, P. ; SCHMECK, H. : Electric Load Management in Smart Homes Using Evolutionary Algorithms. In: *Proceedings of the main European events on Evolutionary Computation*. Malaga, Spain : J.-K. Hao and M. Middendorf, Apr. 2012
- [6] ALLERDING, F. ; SCHMECK, H. : Organic Smart Home - Architecture for Energy Management in Intelligent Buildings. In: *Proceedings des Workshops Organic Computing (ICAC)*, 2011
- [7] ALPHAEOS AG: *Projektsteckbrief 'B10 - Case Study House for The Future'*. Febr. 2014
- [8] AURONIK GMBH: *Auronik Produkte*. <http://www.auronik.de/produkte/>, . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [9] BDEW: *Fahren von Elektroautos wird noch kundenfreundlicher*. <http://www.bdew.de/internet.nsf/id/20140228-pi-fahren-von-elektroautos-wird-noch-kundenfreundlicher-de>, . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [10] BECKER, B. ; KELLERER, A. ; SCHMECK, H. : User Interaction Interface for Energy Management in Smart Homes. In: *Proceedings of the 3rd IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 2012

- [11] BLESS, R. ; MINK, S. ; BLASS, E.-O. ; CONRAD, M. ; HOF, H.-J. ; KUTZNER, K. ; SCHÖLLER, M. : *Sichere Netzwerkkommunikation*. Springer, 2005
- [12] BOSCH SOFTWARE INNOVATIONS: *Bosch Software Innovations schafft E-Mobility-Lösung mit übergreifenden Standards*. <http://www.bosch-si.com/de/newsroom/news/pressemitteilungen/pressemitteilungen-17280.html>, 2013. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [13] BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE: *BAFA: KWK-Zuschlag*. [http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft\\_waerme\\_kopplung/stromverguetung/kwk-anlagen\\_bis\\_50kw/kwk-zuschlag/index.html](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/stromverguetung/kwk-anlagen_bis_50kw/kwk-zuschlag/index.html), 2014. – [Zugriff am 30.05.2014]
- [14] BUNDESNETZAGENTUR: *Photovoltaikanlagen: Datenmeldungen sowie EEG-Vergütungssätze*. 2014
- [15] CHAKRABORTY, U. K. ; JANIKOW, C. Z.: An analysis of Gray versus binary encoding in genetic search. In: *Information Sciences* 156 (2003), Nr. 3–4, S. 253 – 269. – Evolutionary Computation
- [16] CHRISTOPH M. SCHWARZER (ZEIT ONLINE): *Der Anfang vom Ende des Ladeelends*. <http://www.zeit.de/mobilitaet/2014-04/elektroauto-akku-infrastruktur-ladesaeulen>, Apr. 2014. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [17] DIE BUNDESREGIERUNG: *Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität*. [http://www.bmbf.de/pubRD/nationaler\\_entwicklungsplan\\_elektromobilitaet.pdf](http://www.bmbf.de/pubRD/nationaler_entwicklungsplan_elektromobilitaet.pdf), Aug. 2009. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [18] DIN: *DIN SPEC 91286 – Elektromobilität – Schemata für Identifikatoren für E-Roaming – Contract ID und EVSE ID*. <http://www.spec.din.de/cmd?level=tpl-art-detailansicht&committeeid=0&artid=145915787&bcrumblevel=2&languageid=de>, Nov. 2011. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [19] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Developing International Standards*. <http://www.din.de/cmd?cmsrubid=57966&level=tpl-unterrubrik&menurubricid=57966&cmssubrubid=57983&menuid=47565&languageid=en&menusubrubid=57983&cmsareaid=47565>, . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [20] EBEE SMART TECHNOLOGIES GMBH: *Der Ladepunkt Berlin*. <http://www.ebeesmarttechnologies.de/?portfolio=ladepunkt-3/>, . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [21] ECRYPT II – EUROPEAN NETWORK OF EXCELLENCE IN CRYPTOLOGY II: *ECRYPT2 Yearly Report on Algorithms and Keysizes (2008-2009)*. <http://www.ecrypt.eu.org/documents/D.SPA.7.pdf>, Jul. 2009. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [22] ELECTRIVE.NET – DER BRANCHDIENST FÜR ELEKTROMOBILITÄT: *eMobility-Dashboard Deutschland*. <http://www.electrive.net/wp-content/uploads/2014/03/eMobility-Dashboard-Deutschland-2012-2013.pdf>, . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [23] ESCRYPT GMBH: *Sicheres eMetering*. <https://www.secmobil.com/index.php?id=7>, . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [24] ESTER, P. ; SEITZ, T. ; BECKS, T. ; PIETSCH, J. : *Umfeldanalyse IKT für Elektromobilität 2013*. Aug. 2013. – Geschäftsstelle der Begleitforschung IKT für Elektromobilität II

- [25] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *EU launches clean fuel strategy*. [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-13-40\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-40_en.htm), Jan. 2013. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [26] EUROPÄISCHES PARLAMENT: *Klimaschutzpolitik: Abgeordnete fordern verbindliche Ziele bis 2030*. <http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/content/20140203IPR34510/html/> Klimaschutzpolitik-Abgeordnete-fordern-verbindliche-Ziele-bis-2030, 2014. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [27] EUROPÄISCHES PARLAMENT: *Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe*. <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//NONSGML+AMD+A7-2013-0444+120-120+DOC+PDF+V0//de>, Apr. 2014. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [28] FRAUNHOFER ESK: *Kommunikation für das Energie-management bei E-Fahrzeugen*. <http://www.esk.fraunhofer.de/de/projekte/SMARTV2G.html>, . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [29] GOTTWALT, S. ; SCHULLER, A. ; FLATH, C. ; SCHMECK, H. ; WEINHARDT, C. : Assessing load flexibility in smart grids: Electric vehicles for renewable energy integration. In: *Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE*, 2013, S. 1–5
- [30] GREEN EMOTION: *Development of a European Framework for Electromobility – Deliverable 3.2: ICT Reference Architecture*. [http://www.greenemotion-project.eu/upload/pdf/deliverables/D3\\_2-ICT-Reference-Architecture-V1\\_2-submitted.pdf](http://www.greenemotion-project.eu/upload/pdf/deliverables/D3_2-ICT-Reference-Architecture-V1_2-submitted.pdf), Apr. 2012. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [31] HOMEPLUG ALLIANCE: *HomePlug Green PHY™ Specification*. [http://www.homeplug.org/tech/homeplug\\_gp](http://www.homeplug.org/tech/homeplug_gp), . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [32] HUBJECT: *Open InterCharge Protocol v1.1*. [http://www.hubject.com/pdf/closed/v\\_1.1\\_Open\\_Intercharge\\_Protocol\\_\(OICP\).pdf](http://www.hubject.com/pdf/closed/v_1.1_Open_Intercharge_Protocol_(OICP).pdf), . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [33] HUBJECT: *Informationen über eRoaming*. [http://hubject.de/pdf/Hubject\\_ueber\\_eRoaming.pdf](http://hubject.de/pdf/Hubject_ueber_eRoaming.pdf), 2013. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [34] HUBJECT: *Erste Zertifizierungsstelle für emobility-Zertifikate geht in Betrieb*. [http://www.hubject.com/pdf/PM\\_hubject\\_20140331.pdf](http://www.hubject.com/pdf/PM_hubject_20140331.pdf), Apr. 2014. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [35] HUBJECT GMBH: *Hubject – Connecting EMobility Networks*. <http://www.hubject.com/>, . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [36] HUBJECT GMBH: *Informationen über eRoaming*. [http://www.hubject.com/pdf/Hubject\\_ueber\\_eRoaming.pdf](http://www.hubject.com/pdf/Hubject_ueber_eRoaming.pdf), . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [37] IEC: *IEC 61851-1: Elektrische Ausrüstung von Elektro-Straßenfahrzeugen – Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. 2012
- [38] INSYS MICROELECTRONICS GMBH: *Smart Charging nach ISO 15118 – Kommunikation über HomePlug Green PHY*. <http://www.insys-icom.de/icom/de/application-notes/AN174>, 2013. – [Zugriff am 09.05.2014]

- [39] ISO: *ISO 15118-2:2014: Road vehicles – Vehicle-to-Grid Communication Interface – Part 2: Network and application protocol requirements*. [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=55366](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=55366), Apr. 2014. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [40] KASCHUB, T. ; JOCHEM, P. ; FICHTNER, W. : Steigerung des Elektrizitätseigenverbrauchs von Heim-Fotovoltaikanlagen durch Elektrofahrzeuge. In: *wuf UmweltWirtschaftsForum* 21 (2013), Nr. 3-4, S. 243–250. – ISSN 0943–3481
- [41] KEBA AG: *KEBA – Produkte – KeContact M10*. <http://www.keba.com/de/energieautomation/kemove-elektromobilitaet/produkte/kecontact-m10/ihr-nutzen/>, . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [42] KOVACS, A. ; MARPLES, D. ; SCHMIDT, R. ; MORSZTYN, R. : Integrating EVs into the Smart-Grid. In: *ITS Telecommunications (ITST), 2013 13th International Conference on*, 2013, S. 413–418
- [43] LANDESAGENTUR FÜR ELEKTROMOBILITÄT UND BRENNSTOFFZELLENTechnologie BADEN-WÜRTTEMBERG GMBH: *LivingLab BW<sup>e</sup> mobil – Die Projekte des baden-württembergischen Schaufensters Elektromobilität stellen sich vor*. [http://www.e-mobilbw.de/files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/Schaufenster\\_Projektuebersicht\\_RZ\\_Web.pdf](http://www.e-mobilbw.de/files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/Schaufenster_Projektuebersicht_RZ_Web.pdf), . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [44] MITSUBISHI MOTORS: *Mitsubishi Motors to Launch MiEV Power BOX 1500 Watt Power Feeder for its Electric Vehicles*. [http://www.mitsubishi-motors.com/publish/pressrelease\\_en/corporate/2012/news/detail0834.html](http://www.mitsubishi-motors.com/publish/pressrelease_en/corporate/2012/news/detail0834.html), 2014. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [45] MÜLLER-SCHLOER, C. ; SCHMECK, H. ; UNGERER, T. : *Organic Computing – A Paradigm Shift for Complex Systems*. Birkhäuser, 2011 (Autonomic Systems)
- [46] MÜLTIN, M. ; GITTE, C. ; SCHMECK, H. : Smart Grid-Ready Communication Protocols And Services For A Customer-Friendly Electromobility Experience. In: *GI-Edition - Lecture Notes in Informatics (LNI)* Bd. P-220, 2013, S. 1470–1484
- [47] MÜLTIN, M. : Wie IKT die eMobilität und das Smart Grid verbindet. In: *Neue Mobilität* 13 (2013), Okt., S. 26–27
- [48] MÜLTIN, M. ; SCHMECK, H. : Plug-and-Charge and E-Roaming - Capabilities of the ISO/IEC 15118 For The E-Mobility Scenario. In: *at – Automatisierungstechnik* Band 62 (2014), März, Nr. Heft 4, S. 241–248
- [49] NATIONAL SECURITY AGENCY: *The Case for Elliptic Curve Cryptography*. [http://www.nsa.gov/business/programs/elliptic\\_curve.shtml](http://www.nsa.gov/business/programs/elliptic_curve.shtml), Jan. 2009. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [50] NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT: *Technischer Leitfaden Ladeinfrastruktur*. [http://www.elektromobilitaet.din.de/sixcms\\_upload/media/3310/NPE\\_AG\\_4\\_Technischer\\_Leitfaden\\_Ladeinfrastruktur.pdf](http://www.elektromobilitaet.din.de/sixcms_upload/media/3310/NPE_AG_4_Technischer_Leitfaden_Ladeinfrastruktur.pdf), . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [51] NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT: *Die deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität – Version 2*. [http://www.dke.de/de/std/Documents/E-Mobility\\_Normungsroadmap\\_V2.pdf](http://www.dke.de/de/std/Documents/E-Mobility_Normungsroadmap_V2.pdf), Jan. 2012. – [Zugriff am 09.05.2014]

- [52] NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT: *Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (Dritter Bericht)*. 2012
- [53] NEW ENERGY PROMOTION COUNCIL: *Toyota City Low-carbon Society Verification Project (Smart Melit)*. <http://jscp.nepc.or.jp/en/toyota/>, 2014. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [54] OPEN CHARGE ALLIANCE: *Open Charge Point Protocol 2.0 RC1*. <http://openchargealliance.org/documents.php>, Nov. 2013. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [55] PEINTNER, D. : *EXIficient*. <http://exificient.sourceforge.net>, . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [56] PHOENIX CONTACT: *Combined AC/DC Charging System Type 2*. <http://www.phoenixcontact-emobility.com/de/produkte/e-connectivity/combined-acdc-charging-system-type-2>, . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [57] ROLINK, J. ; HORENKAMP, W. ; REHTANZ, C. : Ladeinfrastrukturen für die Netzintegration von Elektrofahrzeugen. In: *at – Automatisierungstechnik* (2012), Febr., S. 84–91
- [58] ROTHLAUF, F. : *Representations for Genetic and Evolutionary Algorithms*. Springer, 2006
- [59] RWE: *Erstmals in den USA: Innovative RWE-Ladetechnik für Elektroautos*. <http://www.rwe.com/web/cms/de/37110/rwe/presse-news/pressemitteilungen/pressemitteilungen/?pmid=4010901>, Apr. 2014. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [60] SCHMUTZLER, J. ; ANDERSEN, C. A. ; WIETFELD, C. : Evaluation of OCPP and IEC 61850 for Smart Charging Electric Vehicles. In: *Proceedings of EVS27: 27th Electric Vehicle Symposium* Bd. 2013, 2013, S. 1–12
- [61] SCHMUTZLER, J. ; WIETFELD, C. : Analysis of message sequences and encoding efficiency for electric vehicle to grid interconnections. In: *Vehicular Networking Conference (VNC), 2010 IEEE*, 2010, S. 118–125
- [62] SCHMUTZLER, J. ; ANDERSEN, C. A. ; WIETFELD, C. : Distributed Energy Resource Management for Electric Vehicles using IEC 61850 and ISO/IEC 15118. In: *Proceedings of VPPC 2012: 8th IEEE International Vehicle Power and Propulsion Conference* Bd. 2012, IEEE, 2012, S. 1–6
- [63] SCHORN, K. : *Erstellung eines Batteriemodells zur Approximation eines optimierten Lade- und Rückspeiseprofiles*, Karlsruher Institut für Technologie, Institut AIFB, Bachelorarbeit, 2012
- [64] SCHULLER, A. ; DIETZ, B. ; FLATH, C. M. ; WEINHARDT, C. : Charging Strategies for Battery Electric Vehicles: Economic Benchmark and V2G Potential. In: *Power Systems, IEEE Transactions on PP* (2014), Nr. 99, S. 1–9
- [65] SCHULLER, A. ; RIEGER, F. : Assessing the Economic Potential of Electric Vehicles to Provide Ancillary Services: The Case of Germany. In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 37 (2013), Nr. 3, S. 177–194

- [66] SIEGFRIED BEST (HÜTHIG VERLAG: *Deutsche Autohersteller setzen mit Ludwigsburger Erklärung Standards*. <http://www.huethig.de/2011/07/15/deutsche-autohersteller-setzen-mit-„ludwigsburger-erklarung“-standards/>, . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [67] SIEMENS AG: *eNterop Projekt*. <http://www.enterop.net>, . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [68] SIEMENS RESEARCH AND DEVELOPMENT: *OpenV2G Project*. <http://openv2g.sourceforge.net>, . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [69] SMARTLAB: *Trianel und smartlab arbeiten im Rahmen ihrer E-Mobilitäts-Angebote zusammen*. <http://smartlab-gmbh.de/aktuelles/meldungen/meldungen-mit-tt-news/detailansicht-meldungen/article/trianel-und-smartlab-arbeiten-im-rahmen-ihrer-e-mobilitaets-angebote-zusammen.html>, Febr. 2014. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [70] VDE: *VDE: Die Steckerfrage für Elektroautos ist geklärt*. <http://www.vde.com/de/Verband/Pressecenter/Pressemeldungen/Fach-und-Wirtschaftspresse/2013/Seiten/2013-03.aspx>, Jan. 2013. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [71] VEKTOR INFORMATIK GMBH: *Lösungen für Elektromobilität*. [http://vector.com/vi\\_electric\\_vehicles\\_de.html](http://vector.com/vi_electric_vehicles_de.html), 2013. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [72] VOLKSWAGEN AG: *INEES – Intelligente Netzanbindung von Elektrofahrzeugen zur Erbringung von Systemdienstleistungen*. <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderung-von-vorhaben-im-bereich-der-elektromobilitaet-ab-2012/kopplung-der-elektromobilitaet-an-erneuerbare-energien-und-deren-netzintegration/inees>, Mai 2013. – [Zugriff am 09.05.2014]
- [73] W3C: *Efficient XML Interchange (EXI) Format 1.0 (Second Edition)*. <http://www.w3.org/TR/exi/>, . – [Zugriff am 09.05.2014]
- [74] WEICKER, K. : *Evolutionäre Algorithmen (2. Auflage)*. Teubner, 2007
- [75] WIETSCHHEL, M. ; PLÖTZ, P. ; KÜHN, A. ; GNANN, T. : *Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge / Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI*. 2013. – Forschungsbericht