



Fachbereich Ingenieurwissenschaften
Studiengang Erneuerbare Energien



Entwicklung von Lastzeitreihen anhand der Analyse verschiedener Einflussparameter

Masterarbeit

15.07.2014

Eva Alica Schuster

Referent: Prof. Dr. Eberhardt Waffenschmidt, Fachhochschule Köln
Korreferentin: Dr. Maike Stark, Amprion

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, die Masterarbeit „**Entwicklung von Lastzeitreihen anhand der Analyse verschiedener Einflussparameter**“ selbstständig und lediglich unter Benutzung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst zu haben.

Ich erlaube, dass die Arbeit von Herrn Professor Waffenschmidt im Internet veröffentlicht wird.

Abbildung 4 und Abbildung 14 wurden von anderen Autoren übernommen. Die Nutzungsrechte für die Veröffentlichung im Rahmen dieser Masterarbeit sind mir erteilt worden. Alle übrigen Abbildungen habe ich selbst angefertigt.

Dortmund, den

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1. Einleitung	9
1.1. Strombedarf	10
1.2. Lastprofile	11
2. Vorgehensweise	12
2.1. Methodik	13
2.1.1 Jährliche Wachstumsrate	13
2.1.2 Einflussparameter	14
3. Bestimmung des Strombedarfs nach Trendverlauf	15
3.1. Derzeitiger Bedarf	16
3.2. Neue Technologien	17
3.2.1 Mobilitätsentwicklung	17
3.2.2 Wärmeerzeugung	21
3.3. Netzverluste	23
4. Bestimmung des Strombedarfs nach Einflussparametern	23
4.1. Derzeitiger Strombedarf in Abhängigkeit des Bruttoinlandsproduktes	24
4.2. Derzeitiger Strombedarf in Abhängigkeit der Bevölkerungszahl	27
4.3. Haushaltsbedarf in Abhängigkeit von Haushaltsgröße, Produkteffizienz und erhöhter Elektrifizierung der Haushalte	30
4.4. Neue Technologien in Abhängigkeit von Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung	32
4.5. Energieeffizienz	33
4.6. Auswertung	34
5. Verwendete Lastprofile	37
5.1. Lastprofil der Übertragungsnetzbetreiber	38
5.2. Synthetisches Lastprofil	38
5.2.1 Lastprofil des öffentlichen Verkehrs	38
5.2.2 Industrieprofil	39
5.2.3 Ladeprofil von Elektrofahrzeugen	39
6. Bedienung des Berechnungswerkzeuges	41
6.1. Berechnung des Strombedarfs im Tool	42
6.2. Bedienung des Lastprofils im Tool	44
7. Stärken und Schwächen	45
8. Zukunftsaussichten	46
9. Fazit	48
10. Quellen	51
11. Anhang 1: Spezifischer Strombedarf nach Bruttoinlandsprodukt	55

12.	Anhang 2: Spezifischer Strombedarf nach Bevölkerungszahl	57
13.	Anhang 3: Prognose des Strombedarfs nach Einflussparametern	58
14.	Anhang 4: Lastzeitreihen des synthetischen Lastprofils	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entwicklung des Strombedarfs jedes Sektors von 1990 bis 2012 (Nach Daten von [ARB13]).....	16
Abbildung 2:	Historische und prognostizierte Entwicklung der Fahrzeugzahlen in Deutschland von 1955 bis 2020 (Nach Daten von [KBA14], [BER14])	19
Abbildung 3:	Entwicklung der Anzahl an Elektrofahrzeugen von 2006 bis 2050 (Nach Daten von [KBA14])	20
Abbildung 4:	Zusammenhang zwischen Bruttoinlandsprodukt, Bevölkerung und Strombedarf der Schweiz [VER12]	24
Abbildung 5:	Zusammenhang zwischen Bruttoinlandsprodukt und Strombedarf (Nach Daten von [STA14])	24
Abbildung 6:	Häufigkeitsverteilung des Quotienten aus dem Index des Strombedarfs der Industrie geteilt durch den Index des Bruttoinlandsproduktes.....	26
Abbildung 7:	Divergenz von Bruttoinlandsprodukt und Strombedarfssektoren	26
Abbildung 8:	Historischer und prognostizierter Verlauf des Strombedarfs in Abhängigkeit des Bruttoinlandsproduktes	27
Abbildung 9:	Zusammenhang zwischen Strombedarf und Bevölkerungszahl (Nach Daten von [DES14a]).....	28
Abbildung 10:	Häufigkeitsverteilung des Quotienten aus dem Index des Strombedarfs des Verkehrs geteilt durch den Index der Bevölkerungszahl.....	29
Abbildung 11:	Entwicklung von Bevölkerungszahl und Strombedarfssektoren.....	29
Abbildung 12:	Historischer und prognostizierter Verlauf des Strombedarfs in Abhängigkeit der Bevölkerungszahl.....	30
Abbildung 13:	Zusammenhang zw. Stromverbrauch er privaten Haushalte und dem Anteil an Einpersonenhaushalten (Nach Daten von [ARB13] und [DES14c])	31
Abbildung 14:	Aufteilung des Stromverbrauchs der privaten Haushalte nach Anwendungsarten in 1996 und 2011 [BDE13].....	31
Abbildung 15:	Entwicklung von Bruttoinlandsprodukt, Bevölkerungszahl und Anzahl an Elektrofahrzeugen	33
Abbildung 16:	Historische und prognostizierte Entwicklung der Strombedarfssektoren nach gewichteter Abhängigkeit von Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung.....	37
Abbildung 17:	Jahresprofil der Übertragungsnetzbetreiber von 2011	38
Abbildung 18:	Synthetisches Lastprofil des Basisjahres 2011	41
Abbildung 19:	Oberfläche des Berechnungswerkzeuges bei Auswahl der Trendmethode.....	43
Abbildung 20:	Oberfläche des Tools bei Kalkulation nach Einflussparametern	44
Abbildung 21:	Oberfläche des synthetischen Lastprofils	45
Abbildung 22:	Häufigkeitsverteilung des spezifischen Strombedarfs des Haushaltsbedarfs nach Index 1991=100 des Bruttoinlandsproduktes und des Strombedarfs.....	55

Abbildung 23:	Häufigkeitsverteilung des spezifischen Strombedarfs des Gewerbe-, Handels-, Dienstleistungsbedarfs nach Index 1991=100 des Bruttoinlandsproduktes und des Strombedarfs.....	55
Abbildung 24:	Häufigkeitsverteilung des spezifischen Strombedarfs des Verkehrsbedarfs nach Index 1991=100 des Bruttoinlandsproduktes und des Strombedarfs.....	55
Abbildung 25:	Häufigkeitsverteilung des spezifischen Strombedarfs des Haushaltsbedarfs nach Index 1990=100 der Bevölkerungszahl und des Strombedarfs.....	57
Abbildung 26:	Häufigkeitsverteilung des spezifischen Strombedarfs des Industriebedarfs nach Index 1990=100 der Bevölkerungszahl und des Strombedarfs.....	57
Abbildung 27:	Häufigkeitsverteilung des spezifischen Strombedarfs des Gewerbe-, Handel-, Dienstleistungsbedarfs nach Index 1990=100 der Bevölkerungszahl und des Strombedarfs.....	57
Abbildung 28:	Auf 1000 kWh skaliertes Standartlastprofil Haushalte [VSG14]	60
Abbildung 29:	Auf 1000 kWh skaliertes Standartlastprofil GHD [VSG14]	60
Abbildung 30:	Auf 1000 kWh skaliertes Standartlastprofil Heizbedarf [STA14]	60
Abbildung 31:	Auf 1000 kWh skaliertes Lastprofil Verkehr (Eigene Berechnung).....	61
Abbildung 32:	Auf 1000 kWh skaliertes Industrieprofil [FRA13]	61
Abbildung 33:	Auf 1000 kWh skaliertes Ladeprofil für das ungesteuerte Laden von EV	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Steigung der Strombedarfssektoren	17
Tabelle 2:	Variablen der Gleichung $N \cdot V \cdot s = E$ für den Teilbereich Mobilität	21
Tabelle 3:	Standartabweichung des spezifischen Strombedarfs in Abhängigkeit des Bruttoinlandsproduktes	25
Tabelle 4:	Standartabweichung des spezifischen Strombedarfs in Abhängigkeit der Bevölkerungszahl.....	28
Tabelle 5:	Stromproduktivität und deren jährliche Wachstumsrate	34
Tabelle 6:	Abweichung der Zeitreihe vom parallelen Verlauf zwischen Bedarfssektor und dem jeweiligen Einflussparameter	34
Tabelle 7:	Gewichtung des Einflusses durch die Parameter Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung auf die jeweiligen Bedarfssektoren	35
Tabelle 8:	Darstellung aller benötigten Konstanten und Variablen für die Prognose des Strombedarfs nach Formel 4.3	36
Tabelle 9:	Prozentualer Strombedarf nach Uhrzeiten	39
Tabelle 10:	Entwicklung des spezifischen Stromverbrauchs nach dem Bruttoinlandsprodukt von 1991 bis 2011	56
Tabelle 11:	Entwicklung des spezifischen Stromverbrauchs nach der Bevölkerungszahl von 1991 bis 2011	58
Tabelle 12:	Berechnung der Gewichtung der Einflussparameter auf den jeweiligen Bedarfssektor... 58	
Tabelle 13:	Abweichung zwischen historisch gemessenen Werten und errechneten Werten nach Formel 4.3	59

Abkürzungsverzeichnis

BIP	Bruttoinlandsprodukt
bzw.	beziehungsweise
DSM	Demand-Side-Management
EW	Einwohner
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunden
TWh	Terrawattstunde

1. Einleitung

Die Frage nach der Entwicklung des Energiebedarfs in Deutschland nimmt in Zeiten wachsender Ressourcenknappheit einen immer wichtigeren Stellenwert ein. Um diesem Trend entgegen zu wirken, werden vermehrt erneuerbare Energien eingesetzt. Die Frage bleibt jedoch, wie sich der Strombedarf in den kommenden Jahren entwickeln wird.

Die Netzintegration der erneuerbaren Energien besetzt bei der Umorientierung von fossilen Brennstoffen zu einer nachhaltigen Versorgung eine immer entscheidendere Rolle. Um das volatile Angebot optimal nutzen zu können, wird eine erhöhte Vernetzung mit umliegenden Ländern und der Ausbau der Übertragungsnetze angestrebt. Die Methodik einer Marktsimulation wird seit einigen Jahren zur Ermittlung des erwarteten Kraftwerkseinsatzes verwendet. Darin werden alle zur Verfügung stehenden Kraftwerke aufgeführt und aus wirtschaftlichen Aspekten und dem erwarteten Energiebedarf der Einsatz der Kraftwerke abgeschätzt. Die Merit-Order beschreibt diesbezüglich, die Einsatzreihenfolge der Kraftwerke aus finanziellem Aspekt. Demnach werden schrittweise die günstigsten Kraftwerke zugeschaltet, bis der Bedarf gedeckt ist. Dafür ist es notwendig zum einen den jährlichen Stromverbrauch zu kennen und zum anderen den Bedarf in Form einer stündlichen Lastzeitreihe zu identifizieren. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Werkzeuges, welches mittels hinterlegter Eingangsparameter den Strombedarf bis zum Jahre 2050 vorhersagen kann und in einem Lastprofil abbildet. Dieses soll der langfristigen Prognostizierbarkeit des Strombedarfs dienen und in Form eines Softwarekonzeptes in Excel dargestellt werden. Da dieses Modell für verschiedene Szenarien variierbar sein soll, wird eine Methodik zur zukünftigen Strombedarfsberechnung erarbeitet und in einem Tool hinterlegt, welches vom Anwender dynamisch bedient werden kann.

Die Entwicklung dieser Methodik orientierte sich am Projekt e-highway 2050, das im Jahre 2012 von der Europäischen Kommission ins Leben gerufen wurde. Darin wird die Entwicklung des Strombedarfs bis zum Jahre 2050 anhand einer Vier-Schritt-Methode untersucht, die in Kapitel 2 noch einmal aufgegriffen wird, um damit einen modularen Entwicklungsplan für das paneuropäische Übertragungsnetz zu erstellen. Daran beteiligt sind europäische Unternehmen, Universitäten, Agenturen und Vereinigungen. Mit Hilfe einer Langzeitprognose soll es möglich sein, die kommenden Veränderungen für das europäische Übertragungsnetz abzuschätzen und einen Expansionsplan im Einklang mit der europäischen Energiepolitik zu entwickeln [EHI14].

Zur Berechnung des Bedarfs werden zwei Methoden verwendet. Zum einen die Kalkulation nach dem bisherigen Trend des Stromverbrauchs, und zum anderen die Berechnung nach Einflussparametern. Die Prognose des Stromverbrauchs nach Trendverlauf basiert größtenteils auf historischen Daten. Dadurch wird ein langfristiger Trend jedes Strombedarfssektors und damit eine realistische Tendenz über den jeweiligen Verlauf abgebildet. Materialsammlungen zur Beschreibung des Staats- und Volkslebens werden schon seit Anfang des 19. Jahrhunderts unternommen. Das statistische Bundesamt liefert statistische Informationen für Entscheidungsprozesse einer demokratischen Gesellschaft und versichert dabei die Neutralität, Objektivität und wissenschaftliche Unabhängigkeit ihrer Arbeit [DES14]. Die Prognose des Strombedarfs nach Einflussparametern erfolgt in Abhängigkeit ausgewählter Faktoren. Darin inbegriffen ist die Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes und der Bevölkerungszahl, die nach [EHI14] als wichtigste Einflussparameter identifiziert wurden. Das Berechnungs-

werkzeug wird in Excel erstellt und die errechnete jährliche Stromnachfrage in ein Lastprofil übertragen. Excel bietet dabei eine solide Grundlage, da dieses Programm auf fast allen Rechnern verfügbar ist und es deshalb flächendeckend genutzt werden kann. Der Anwender braucht dafür weder spezielle Programme zu installieren, noch sich in eine neue Software einzuarbeiten. Der Gesamtstrombedarf setzt sich in dieser Arbeit zum einen aus dem *Derzeitigen Bedarf* durch Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), Verkehr und Industrie und zum anderen aus dem zukünftig vermehrten Bedarf durch *Neue Technologien* wie Wärmepumpen und Elektrofahrzeuge zusammen.

Um den Strombedarf in einem Lastprofil abzubilden, wird zum einen das gemessene Profil der Übertragungsnetzbetreiber und zum anderen Standardlastprofile nach BDEW/VDEW verwendet. Da solche Profile nur für den Bedarf durch Haushalt und GHD existieren, wird zur Abbildung des Strombedarfs der Industrie eine Zeitreihe anhand einer Studie der Fraunhofer Umsicht konstruiert. Das Forschungsinstitut, das durch die Forschung und Entwicklung in den Bereichen Energie, Prozesse und Produkte ein nachhaltiges und umweltschonendes Wirtschaften und innovatives Verhalten anstrebt, stellt eine verlässliche Quelle zur Verwendung ausgearbeiteter Methoden dar. Auch der Bedarf durch öffentliche Verkehrsmittel ist nicht in einem standardisierten Profil erfasst, beziehungsweise nicht öffentlich verfügbar. Zu diesem Zweck werden einige Annahmen über die Verkehrsauslastung an Werktagen und am Wochenende unter Beratung mit dem Experten für Nahverkehrssysteme der RWTH Aachen Adolf Müller-Hellmann getroffen. Dieser veröffentlichte seit 1975 etwa 150 Untersuchungen zur elektrischen Versorgung des Nahverkehrs. Ein Ladeprofil für das ungesteuerte Laden von Elektrofahrzeuge wird mit Hilfe der Bachelorarbeit von Sebastian Janocha erstellt. Dieser modelliert die Fahrprofile mit Hilfe der Software Matlab/Simulink, um mittels unterschiedlicher Fahrzeugtypen ein realistisches Bedarfprofil über den zeitlichen Strombedarf zu simulieren. Das gesteuerte Laden soll über Nacht erfolgen. Dem Nutzer steht es dabei frei den Anteil der Fahrzeuge, die gesteuert bzw. ungesteuert geladen werden, und deren Ladezeiten zu variieren. Außerdem kann die Nutzungshäufigkeit der Ladeleistungen eingestellt werden.

1.1. Strombedarf

Seit der Elektrifizierung von Haushalten und der Industrie steigen die Vernetzung und der Verbrauch kontinuierlich. Immer weitere Teile der Erde können flächendeckend mit einem Stromanschluss versorgt werden. Die weltweit wachsende Bevölkerung und voranschreitende Industrialisierung in Schwellenländern steigert den Energiebedarf jährlich. Der Pro-Kopf-Bedarf dieser Regionen liegt jedoch weit unter dem der westlichen Industrienationen, was vor allem an der stetigen Elektrifizierung und Automatisierung von Prozessen und Produkten liegt, aber auch an der Entwicklung neuer Technologien, die dem westlichen Nutzer den Alltag erleichtern sollen. Die Nachfrage entsteht dabei zum einen aus der Industrie und privaten Haushalten, zum anderen aus dem Sektor GHD und dem Verkehr durch öffentliche, schienengebundene Fahrzeuge. Außerdem erhöhen der Eigenverbrauch der Kraftwerke und Netzverluste den Gesamtbedarf. Doch durch den steigenden Bedarfsanstieg werden auch die Rohstoffe zur Erzeugung geringer. Erdöl stellt den weltweit wichtigsten Energieträger dar. Rund 34 % der globalen Primärenergie wurden in 2010 durch Erdöl gedeckt. Laut [BER14] wird der Anteil auch in 2035 noch 29 % betragen. Der Energiebedarf der durch Kohle gedeckt wird, machte in 2010 30% aus und wird auch in 2035 auf diesem Niveau mit 27 % der Versorgung des Primärenergie-

bedarfs bleiben. Erdgas stellt in der Reihe der Energieträger den drittichtigsten Versorger dar, während Kernenergie nur noch in Asien, China, den USA und Teilen Europas eine Rolle spielt. Erneuerbare Energien dagegen nehmen in Europa einen immer wichtigeren Stellenwert ein. Der wachsende Bedarf an Energierohstoffen insbesondere in Schwellenländern sowie vereinbarte Ziele der Politik zur Senkung von Treibhausgasen verstärken die Notwendigkeit der Umorientierung. Zu diesem Zweck wurde das Energiekonzept der Bundesregierung im Jahr 2010 initiiert. Darin wird die Entwicklung und Umsetzung einer langfristigen Gesamtstrategie, zur Sicherstellung einer ökologischen, ökonomischen und wirtschaftlichen Energieversorgung, beschrieben. Bisher konnten Maßnahmen wie die Einführung des Erneuerbaren Energien Gesetzes den Anteil derer am Gesamtstrombedarf auf 24 % in 2013 erhöhen und auf Grund der Bestrebungen zur effizienten Nutzung der Ressourcen fiel der Anstieg des Energiebedarfs weniger stark aus [UNE14]. Der Wohlstand und das wirtschaftliche Wachstum eines Landes sind jedoch in hohem Maße von der Versorgungssicherheit mit Energie abhängig, die für Unternehmen und ganze Volkswirtschaften dadurch zu einem immer wichtigeren Gut wird. Um geopolitisch unabhängig zu werden rückt der Ausbau erneuerbarer Energie weiter in den Fokus paneuropäischer Bestrebungen. Um diese Quelle optimal zu nutzen und Frequenzschwankungen und Ausfälle des Kraftwerkparks oder des Netzes abzufangen, nimmt auch die Verdichtung der nationalen und internationalen Vernetzung zu. Daher wird der technische und kommunikative Austausch mit den Nachbarländern Deutschlands zu einer wichtigen Phasen der Energiewende [BER14]. Die technischen Fortschritte und Entwicklungsbestrebungen in einzelnen Ländern werden inzwischen auf elektronischen Plattformen ausgetauscht und in europäischen Zusammentreffen zwischen den Übertragungsnetzbetreibern der Länder diskutiert.

1.2. Lastprofile

Lastprofile beschreiben in der Energieversorgung den zeitlichen Verlauf des elektrischen Leistungsbedarfs. Das heißt die abgenommene elektrische Leistung wird über eine Periode in konstanten Abständen gemessen und daraus ein Profil erstellt. Der Lastgang unterscheidet sich dabei zwischen Wochentagen und Wochenenden, Tag und Nacht und nimmt auch in den verschiedenen Jahreszeiten unterschiedliche Ausprägungen an. Außerdem unterliegt der Lastgang ständigen Schwankungen durch Temperatur- oder Verhaltensänderungen der Bevölkerung. Die erzeugte Energie muss zu jedem Zeitpunkt dem Bedarf entsprechen, weshalb die Einspeisung den zeitlichen Schwankungen des Stromverbrauchs exakt nachgehen muss [LEC09]. Dafür müssen die Kraftwerksfahrpläne im Voraus festgelegt werden, was die Bedeutung einer adäquaten Darstellung eines Lastprofils steigert.

Zur besseren Prognostizierbarkeit des Strombedarfs, wird der Verbrauch von Kleinkunden, die eine Abnahme von unter 30.000 kWh/a haben [VDE00], anhand eines Standardlastprofils vorhergesagt. Dazu werden Stichproben einer repräsentativen Gruppe von Kunden gemessen und als Maßstab für Lieferungen verwendet. Bei entsprechender Auswahl der Stichproben ist die Zuverlässigkeit kaum geringer als bei Messung der Gesamtgruppe [VDE99]. Eine Vorhersage für den einzelnen Verbraucher ist damit nicht möglich, aber für eine große Verbraucherguppe, bei der sich die individuellen Schwankungen gegenseitig herausmitteln, lässt sich eine relativ genaue Prognose treffen [ENE14a]. Die Unterschiede der resultierenden Summenlastgänge, werden ab einer bestimmten Anzahl von privaten wie auch gewerblichen Kunden relativ gering, weshalb für den Strombedarf im Haushalt und

in Gewerben ein einheitliches Profil angenommen werden kann [VDE99], [VDE00]. Die Standardlastprofile wurden aus ermittelten Lastgängen aus Feldversuchen im Zusammenhang mit der Tarifreform und aus vorhandenen Lastgängen anderer Messungen und Daten von Niederspannungskunden, davon 332 Haushaltskurven, klassifiziert und zusammengestellt [VDE99]. Dabei wird zwischen den charakteristischen Tagen Werktag und Wochenende, wobei Samstage und Sonntage einen jeweils eigenen Verlauf aufzeigen, unterschieden. Für diese Tage werden je nach Zeitzone, Sommer, Winter und Übergangszeit, viertelstündliche Leistungsmittelwerte angegeben. Zur Abbildung des Haushaltsbedarfs wurden dafür Rechenwerte verwendet. Alle 96 Werte pro Tag werden gemittelt und auf einen Gesamtbedarf von 1000 kWh/a normiert. Der Lastgang muss je Kundengruppe nach seinem Jahresprofil skaliert werden [VDE00]. Das heißt es wird das typische Verbraucherverhalten eines Endverbrauchers durch „normierte kundengruppen- oder branchenbezogene Verbrauchsmuster ersetzt. Durch die Gewichtung mit der gemessenen Jahresarbeitsmenge wird so im Nachhinein ein Lastprofil für diese Verbrauchergruppe angenähert.“ [LEC09]. Bei Großlieferungen werden zeit-echte Messungen auf Viertelstundenbasis verwendet. Diese werden online veröffentlicht und sollen eine möglichst exakte Einspeisung der Abnahmekurve erzielen [VDE99].

2. Vorgehensweise

In dieser Arbeit soll ein Berechnungswerkzeug entwickelt werden, mit dessen Hilfe der Strombedarf bis zum Jahre 2050 berechnet werden kann. Außerdem soll der Verbrauch in Form eines Lastprofils über ein Jahr aufgezeigt werden. Da immer wieder verschiedene Prognosen zur Entwicklung des Strombedarfs veröffentlicht werden und unterschiedliche Szenarien kalkuliert werden sollen, wird das Tool variabel sein und vorrangig eine Berechnungsmethodik aufzeigen, nach welcher der Stromverbrauch vorhergesagt werden kann. Es werden deshalb Werte hinterlegt, mit denen der Strombedarf kalkuliert wird. Außerdem soll für den Nutzer die Möglichkeit bestehen eigene Daten für die Berechnung einzugeben. Die Ermittlung des Strombedarfs erfolgt in Anlehnung an die folgende Vier-Schritt-Methode des e-highway 2050 Projektes [EHI14]:

1. Ökonomische und ökologische Aspekte: Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes und der Bevölkerungszahl bis zum Jahr 2050
2. Technologie: Expandierender Strombedarf durch Elektrifizierung von Heizung und Transport
3. Politik, Soziopolitik und Umwelt: Energieeffizienz in Bezug auf jährlichen Stromverbrauch in Abhängigkeit des Bruttoinlandsproduktes
4. Gesamtenergiebedarf inklusive Verluste: Summe über alle Bedarfssektoren zuzüglich der Verluste

Der Strombedarf wird mit zwei Methoden ermittelt. Zum einen wird die Entwicklung anhand archivierter Werte vorhergesagt, zum anderen wird der Verlauf mittels der Einflussparameter Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung prognostiziert. Darin inbegriffen sind der derzeitige Bedarf durch Haushalte, Industrie, GHD und den Verkehr sowie ein künftig vermehrter Bedarf durch elektrifizierte Heizungen und Fahrzeuge. Außerdem soll die Entwicklung des Strombedarfs in Bezug auf die Energieeffizienz untersucht werden und entstehende Netzverluste auf die Summe des ermittelten jährlichen Strombedarfs aufgeschlagen werden. Die verwendeten Berechnungsmethoden um den Strom-

bedarf zu prognostizieren werden in Kapitel 3 und 4 aufgezeigt. Die gesamte Simulation ist dann im Berechnungstool ersichtlich.

Um den Strombedarf in einem Lastprofil abzubilden, wird sowohl das gemessene Profil der Übertragungsnetzbetreiber verwendet als auch ein synthetisches Lastprofil erzeugt. Im Profil der Übertragungsnetzbetreiber ist bereits der gesamte Bedarf Deutschlands über ein Jahr erfasst, weshalb dieses Profil für sich steht. Für die Erarbeitung eines synthetischen Profils werden vornehmlich Standardlastprofile verwendet. Für alle Sektoren, für die ein solches Profil nicht existiert, werden Profile anhand von ausgewählten Studien und Analysen erstellt.

Anschließend wird das aufgebaute Berechnungswerkzeug erläutert und Hinweise zur Bedienung gegeben. Außerdem werden die Stärken und Schwächen des Tools und der verwendeten Methodik werden diskutiert und ein Ausblick darüber gegeben, welche Maßnahmen in der Zukunft noch Relevant werden könnten und welches Ausbaupotenzial das Werkzeug bietet.

2.1. Methodik

Nachfolgend werden zwei Berechnungsmethoden zur Prognose des zukünftigen Strombedarfs aufgezeigt. Die Entwicklung der Lastzeitreihen verläuft individuell nach Bedarfssektoren, weshalb hier keine allgemeine Methode vorgestellt wird, sondern das jeweilige Vorgehen entsprechend in Kapitel 6.2 erörtert wird.

Die erste Variante der Stromprognose beschreibt die Entwicklung als Trendverlauf, das heißt als eine Fortsetzung des historischen Verlaufs. Die zweite Methode prognostiziert den Strombedarf nach der Entwicklung der Einflussparameter Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung. Vorteil der ersten Methode ist die Darstellung des tatsächlichen Verlaufs. Der Nachteil besteht jedoch darin, dass politische Unsicherheiten nicht berücksichtigt werden. In Variante zwei werden aktuelle Veränderungen verfolgt und ermöglicht auf politische Umstrukturierungen einzugehen. Ein Nachteil zeigt sich jedoch darin, dass der bisherige Zusammenhang zwischen Bedarf und Parameter nicht zwangsläufig in dieser Form bestehen muss.

2.1.1 Jährliche Wachstumsrate

Bei dieser Methode wird der Strombedarf Deutschlands anhand der Bottom-up Methode erarbeitet. Dabei wird von den einzelnen Bedarfssegmenten herkommend auf den Gesamtbedarf geschlossen. Zur Bestimmung des Bedarfs werden vorrangig historische Werte verwendet. Sollten zu einem Thema, keine Werte vorliegen oder besteht die Annahme, dass die Werte zukünftig stark vom bisherigen Verlauf abweichen werden, werden Prognosen zu Hilfe genommen, die an entsprechender Stelle vorgestellt werden. Mit Hilfe der archivierten Werte kann eine Wachstumsrate errechnet werden. Diese wird häufig in der Statistik verwendet, um kapitalisierte Zinsen, das heißt auf das Kapital übergegangene Zinsen des Vorjahres, zu berechnen. Durch diese Zinseszins-Methode wird das jährliche Wachstum in der Berechnung berücksichtigt. Sie umfasst den Anfangs- und Endwert einer Zeitreihe sowie die zeitliche Differenz, sodass die Steigung nicht im Gesamten, sondern jährlich erfasst wird. Dadurch wird es möglich die Zeitreihe für die Zukunft zu erweitern und die zugehörigen Werte mit Hilfe der ermittelten Wachstumsrate nach Formel 2.1 zu berechnen [KOS66].

$$\left(\frac{A_t}{A_{t_0}}\right)^{\frac{1}{N}} - 1 = r \quad (2.1)$$

A_t	Endwert (letzter verfügbarer Wert)
A_{t_0}	Anfangswert (erster dokumentierter Wert)
N	Jahresdifferenz zwischen Anfangsjahr und Zieljahr (t_1-t_0)
r	Wachstumsrate

Da die Daten mancher Parameter bereits von 2013 veröffentlicht wurden, die Werte anderer Faktoren jedoch nur bis 2011 reichen, werden alle Parameter anhand der ermittelten Wachstumsrate auf das Basisjahres 2013 hochgerechnet. Dies ermöglicht eine realistische Vorhersage anhand der aktuellsten verfügbaren Werte. Alle weiteren Berechnungen beruhen anschließend auf diesen Werten, die im Tool, zusammen mit den Variablen der Gleichung hinterlegt sind.

2.1.2 Einflussparameter

Bei dieser Methode wird anhand von Einflussparametern auf die Entwicklung des Strombedarfs geschlossen. Die Relevanz jedes Parameters gegenüber dem Strombedarf wird anhand der Abweichung eines parallelen Verlaufs zwischen Faktor und der Entwicklung des Stromverbrauchs geprüft. Dafür sind mehrere Berechnungen nötig, die nachfolgend vorgestellt werden. Diese Beschreibung von Eigenschaften einer Beobachtungsreihe ist eine Methode der Statistik, wobei die Beobachtungsreihe eine archivierte Zeitreihe des Stromverbrauchs darstellt. Um zu prüfen, welcher Parameter auf welchen Sektor des Strombedarfs den größten Einfluss hat, wird der spezifische Stromverbrauch gebildet. Dabei wird jeder Wert der Zeitreihe eines Verbrauchssektors durch den entsprechenden Wert der Zeitreihe des Parameters geteilt. Bei parallelem Verlauf beider Größen wäre das Ergebnis jedes Quotienten gleich. Je unterschiedlicher der Verlauf beider Parameter ausfällt, desto unterschiedlicher fallen die Quotienten aus. Formel 2.2 beschreibt die Berechnung des spezifischen Strombedarfs, beispielhaft anhand des Einflussparameters Bruttoinlandsprodukt [MEY02].

$$\frac{E_t}{x_{BIP,t}} = E_{spez.Strom,t} \quad (2.2)$$

E_t	Strombedarf zum Zeitpunkt t [kWh]
$x_{BIP,t}$	Bruttoinlandsprodukt zum Zeitpunkt t [€]
$E_{spez.Strom,t}$	spezifischer Strombedarf zum Zeitpunkt t [kWh/€]

Aus den Ergebnissen kann nun eine Häufigkeitsverteilung erstellt werden. Dazu werden die Quotienten aufgelistet und abgezählt, wie oft jedes Ergebnis aufgetreten ist. Anschließend wird der Mittelwert μ aus allen Quotienten errechnet. Der Mittelwert oder auch Erwartungswert stellt mit der Standardabweichung die wichtigste Maßzahl zur Beschreibung der Eigenschaften einer Beobachtungsreihe dar. Wie der Name Erwartungswert schon sagt, kann mit ihm der weitere Verlauf einer Zeitreihe prognostiziert werden. Formel 2.3 zeigt die Berechnung des Mittelwertes des spezifischen Strombedarfs [MEY02]. Dabei wird die Summe des spezifischen Mittelwertes durch die Anzahl der Quotienten ge-

teilt. Der Quotient kann dabei die Zahlen zwischen 0 und n annehmen, was durch den Index i symbolisiert wird ($0 < i < n$).

(2.3)

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n Q_i \cdot p(Q_i)$$

μ	Mittelwert bzw. Erwartungswert [kWh/€]
$E_{\text{spez.Strom},i}$	spezifischer Strombedarf i [kWh/€]
p_i	Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Quotienten i [%]

Zu Letzt kann die Abweichung jedes einzelnen Quotienten vom Mittelwert bestimmt werden, die Standardabweichung. Je größer die Abweichung ausfällt, desto weniger Werte einer Zeitreihe verlaufen parallel. Das heißt umgekehrt, je geringer die Abweichung, desto identischer der historische Verlauf beider Größen. In Formel 2.4 wird die Standardabweichung σ mit Hilfe des errechneten Mittelwertes und dem jeweiligen spezifischen Strombedarf kalkuliert [MEY02].

(2.4)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\mu - Q_i)^2}$$

σ Standardabweichung [kWh/€]

Die errechnete Standardabweichung gibt die Fluktuation einer Zeitreihe, in diesem Fall des spezifischen Strombedarfs, an und wird als positive sowie negative Abweichung der Werte vom Mittelwert angegeben. Damit beschreibt $\mu \pm \sigma$ die Eigenschaften einer Beobachtungsreihe bzw. des spezifischen Strombedarfs. Mit Hilfe der Standardabweichung kann nachfolgend die jeweils größte Parallelität eines Einflussparameters zu einem Stromsektor ermittelt werden.

Die Prognose über den zukünftigen Strombedarf erfolgt dann über den Erwartungswert des jeweiligen Bedarfssektors nach Formel 2.5. Dadurch kann eine Vorhersage über die Entwicklung des Stromverbrauchs anhand eines Parameters erfolgen [MEY02]. Formel 2.5 zeigt die Berechnung der Prognose beispielhaft am Einflussparameter des Bruttoinlandsproduktes.

$$\mu \cdot x_{BIP,t} = P_{\text{Strom},t} \quad (2.5)$$

μ	Erwartungswert [TWh/Mrd. €]
$x_{BIP,t}$	Bruttoinlandsprodukt zum Zeitpunkt t [Mrd. €]
P	Prognosewert des Strombedarfs zum Zeitpunkt t [TWh]

3. Bestimmung des Strombedarfs nach Trendverlauf

Zur Bestimmung des Strombedarfs muss vorerst über die Bottom-up Methode ermittelt werden, wie sich der Strombedarf in Deutschland zusammensetzt. Dabei wird zwischen zwei Teilbereichen des Strombedarfs unterschieden: zum einen dem derzeitigen, das heißt dem bereits existierenden Bedarf durch Haushalte, Verkehr, GHD und Industrie, und zum anderen dem zukünftig zukommenden

Strombedarfsbereich durch neue Technologien (Elektromobilität, vermehrter Einsatz von Wärmepumpen). Zur Bestimmung der weiteren Entwicklung des Strombedarfs werden zwei Methoden verwendet. Nachfolgend wird zuerst die Prognose des Strombedarfs anhand des bisherigen Verlaufs und anschließend mittels geeigneter Einflussparameter aufgezeigt.

3.1. Derzeitiger Bedarf

Der derzeitige Bedarf wird von den Bereichen Industrie, Haushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) und Verkehr ausgemacht. Er zeichnet sich dadurch aus, dass jeder Verbrauchssektor seit 1990 separat erfasst und archiviert wird. Dadurch können die historischen Daten dafür verwendet werden einen Trendverlauf des jeweiligen Strombedarfs abzuleiten. Abbildung 1 zeigt die Entwicklung des Strombedarfs jedes Sektors von 1990 bis 2011. Der Industrieverbrauch nimmt dabei mit im Schnitt 43 % den größten Anteil des derzeitigen Strombedarfs ein. Dieser Bedarfssektor ist außerdem der einzige in dem sich die Wirtschaftskrise in 2009 durch einen rapiden Einsturz des Stromverbrauchs widerspiegelt. Seitdem ist der Strombedarf der Industrie wieder angestiegen. In allen anderen Sektoren wie Haushalt, GHD und Verkehr ist der Strombedarf in den letzten dargestellten Jahren leicht gesunken. Der Verbrauch durch Haushalte und GHD nimmt am Gesamtstrombedarf den gleichen Anteil mit im Schnitt jeweils 27% ein und weist auch bei Betrachtung der historischen Daten einen sehr ähnlichen Verlauf auf. Der Verkehrssektor nimmt mit gerade mal 3 % den geringsten Anteil am Gesamtstrombedarf ein. Außerdem zeigt der Verlauf einen fast linearen Trend mit einer geringfügigen Steigung seit 1990. Insgesamt wurden in 2011 521 TWh Strom für den derzeitigen Bedarf benötigt.

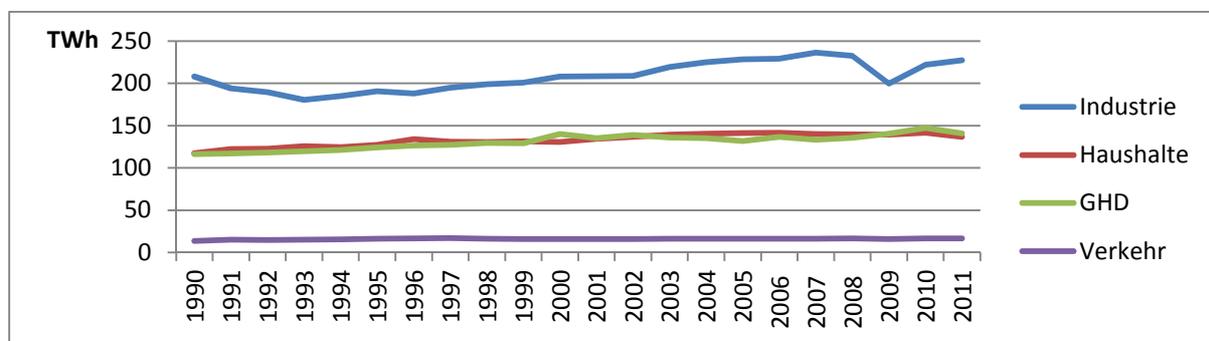


Abbildung 1: Entwicklung des Strombedarfs jedes Sektors von 1990 bis 2012 (Nach Daten von [ARB13])

An Hand des Strombedarfs von 1990 bis 2011 kann nun die jährliche Wachstumsrate mit Formel (3.1) errechnet werden. Sie ergibt sich aus Umstellung von Formel (2.1) und ermöglicht die Kalkulation des Strombedarfs für das Referenzjahr 2013. Dieser Wert wird im Tool hinterlegt so dass alle weiteren Berechnungen mit dem Strombedarf von 2013 und der jeweiligen Wachstumsrate erfolgen.

$$A_{t0} \cdot (1 + r)^N = A_t \quad (3.1)$$

Tabelle 1 zeigt die jährliche Wachstumsrate sowie den errechneten Strombedarf für das Referenzjahr 2013 jedes Sektors.

Tabelle 1: Steigung der Strombedarfssektoren

	Jährliche Wachstumsrate	Strombedarf in 2013
Haushalte	0,4 %	145 TWh
Industrie	0,7 %	232 TWh
GHD	0,9 %	145 TWh
Verkehr	0,9 %	17 TWh
Summe	0,7 %	539 TWh

3.2. Neue Technologien

Das zweite Teilgebiet des Strombedarfs ist ein in Zukunft wachsender Bedarf durch neue Technologien in den Bereichen Heizen und Mobilität. Dafür werden Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen analysiert, die eine Substitution fossiler Energieträger durch Stromanwendungen beschreiben. Darunter wird die Anwendung innovativer, strombetriebener Technologien an Stelle von öl-, gas-, oder anderweitig betriebenen Geräten verstanden. Auf Grund der schrumpfenden Ressourcen kann von einem expandierenden Strombedarf in diesem Sektor ausgegangen werden. Dieses Teilgebiet des Stromverbrauchs zeichnet sich außerdem dadurch aus, dass die benötigte Energiemenge bisher zu gering ist, als dass sie separat erfasst werden würden, weshalb der Strombedarf erst errechnet und anschließend anhand der Anzahl der verwendeten Technologien hochgerechnet werden muss. Dafür wird ermittelt, wie sich die benötigte Energiemenge zusammensetzt, und welches Ausbaupotenzial die jeweilige Technologie birgt.

3.2.1 Mobilitätsentwicklung

Elektrofahrzeuge nehmen in Zeiten des Klimawandels und der Ressourcenschonung einen immer wichtigeren Stellenwert im Bereich der Mobilität ein. Deshalb wurde am 3.Mai 2010 die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) von Vertretern der Politik, Wissenschaft und Industrie initiiert. Ziel des Projektes ist es Deutschland bis zum Jahre 2020 in drei Phasen zum Leitanbieter und Leitmarkt der Elektromobilität zu machen. Phase eins dient dabei der Marktvorbereitung durch Forschung und Entwicklung und soll bis zum Jahre 2014 abgeschlossen sein. In dieser Periode wurden Schaufensterprojekten genutzt, um die Akzeptanz der Elektromobilität zu erproben. Phase zwei fokussiert den Markthochlauf bis 2017. Darin soll der Markt aufgebaut werden und die Infrastruktur die Weichen zur Etablierung der Elektromobilität stellen. Phase drei beschäftigt sich mit dem Massenmarkt bis 2020. In dieser Periode sollen tragfähige Geschäftsmodelle entwickelt werden, so dass unterstützende Maßnahmen der Politik anschließend zurückgefahren werden können [BER14].

Auf diesem Projekt basierend wurde am 18.Mai 2011 das Regierungsprogramm Elektromobilität ange-regt, in dem eine Strategie zur Förderung der Forschung, Entwicklung und Markteinführung der Elektromobilität bis zum Jahre 2020 entwickelt wurde. Dieses Vorgehen soll der Realisierung von einer Millionen Elektrofahrzeugen auf den Straßen Deutschlands verhelfen und Deutschland die Führungsposition auf dem Markt der Elektromobilität sichern [BER14].

In diesem Abschnitt wird vorerst untersucht, wie sich die Elektromobilität nach dem Trend der letzten Jahre entwickeln würde. Dafür werden zum einen die Daten des Kraftfahrtbundesamtes und zum anderen eine Prognose des Kraftstoffanbieters Shell sowie die Monografie „Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr“ von Bertram und Bongard ausgewertet. Das Kraftfahrtbundesamt sammelt

seit 1951 Daten über das deutsche Verkehrsaufkommen und hat zu einer umweltfreundlicheren und verkehrssicheren Mobilität beigetragen [KRA01]. Der Kraftstoffanbieter Shell veröffentlicht immer wieder Studien zur Entwicklung der deutschen Fahrzeuge, um Expansionen und Reduktionen der Verkehrsentwicklung vorherzusagen und Entwicklungen des Kraftstoffs anzupassen. Bertram und Bongard beschäftigen sich vornehmlich mit den Grundlagen der Elektromobilität, den Einflussfaktoren auf deren weitere Entwicklung sowie mit Wirtschaftlichkeitsvergleichen unterschiedlicher Fallstudien. Nachfolgend wird untersucht wie sich der Strombedarf durch E-Fahrzeuge zusammensetzt und die Variablen der Gleichung analysiert.

Strombedarf durch Elektrofahrzeuge

Der Stromverbrauch eines Elektrofahrzeugs errechnet sich wie auch der Kraftstoffverbrauch eines normalen Pkw nach Formel 3.2 durch den Verbrauch und die jährliche Fahrstrecke. Zusätzlich wird in dieser Formel die Anzahl der Fahrzeuge mit eingerechnet, sodass der Gesamtenergiebedarf über alle Fahrzeuge ersichtlich wird.

$$N \cdot V \cdot s = E \tag{3.2}$$

N	Anzahl an Elektrofahrzeugen
V	Stromverbrauch eines E-Fahrzeuges [kWh/km]
s	jährliche Fahrstrecke eines Elektrofahrzeuges [km]
E	Strombedarf [kWh]

Um nun den Gesamtstrombedarf durch Elektrofahrzeuge berechnen zu können, müssen die Kennzahlen der zuvor genannten Gleichung ermittelt werden.

Anzahl an Kraftfahrzeugen

Die Fahrzeugzahlen sind von 1955 bis 2013 kontinuierlich gestiegen. Ausnahme dessen bildet das Jahr 2008, in dem die Wirtschaftskrise einen starken Einbruch des Absatzes verursachte (siehe Abbildung 2). Bis zum Jahr 2013 erreichte sie jedoch einen Spitzenwert von rund 52 Mio. in Deutschland gemeldeten Fahrzeugen [KBA14]. Die Entwicklung der Anzahl an Personenwagen zeigt die gleiche Steigung und erreichte in 2013 einen Wert von 43,4 Millionen, was bei rund 80,5 Mio. [DES14a] Einwohnerinnen und Einwohnern bedeutet, dass mehr als jeder Zweite ein Fahrzeug besitzt. Der bisherige Rückgang der Bevölkerungszahl [DES14b] hatte bislang keinen Einfluss auf die steigenden Zahlen an Fahrzeugen, weshalb einer Studie des Kraftstoffanbieters Shell zufolge, die Anzahl an gemeldeten Fahrzeugen auch weiterhin bis 2020 steigen wird. Die Studie „Shell Pkw-Szenarien bis 2030“ umfasst zahlreiche Aspekte der Mobilitätsentwicklung und wird oft in anderen wissenschaftlichen Analysen wie beispielsweise der des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, oder der Monografie „Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr“ von Bertram und Bongard genannt. Der Shell-Studie zufolge wird die Anzahl der Fahrzeuge bis zum Jahr 2020 eine Sättigung erreichen. Diese Annahme gründet darauf, dass Männer in Familien oder Partnerschaften meist als Halter des Erstwagens auftreten und dies auch für die Zukunft angenommen wird. Es wird zwar eine „automobile Emanzipation“ [SHE09] erwartet, das heißt, der Anteil an Frauen, die ein Auto besitzen wird als steigend angenommen, jedoch wird nicht damit gerechnet, dass der Sättigungsgrad der Männer erreicht wird.

Dieser beträgt in manchen Altersklassen bereits durchschnittlich mehr als ein Fahrzeug pro Person [BER14], [SHE09]. Langfristig wird davon ausgegangen, dass die Anzahl an Personenfahrzeugen bis 2020 auf 49,7 Mio. steigt und dann stagnieren wird [SHE09].

[BER14] greift die Untersuchung des Shell-Konzerns auf, reduziert jedoch den erwarteten Anstieg der Personenwagen auf 44,5 Mio. bis 2020, da der deutsche Automobilmarkt zwar von 1955 bis 2007 eine hohe Wachstumsrate verzeichnen konnte, jedoch nach 2008 eine deutliche Sättigungserscheinung zeigt.

Wird ein Wachstum von 43,4 Mio. Personenwagen in 2013 auf 44,5 Mio. private Pkw in 2020 nach [BER14] angenommen, ergibt sich eine jährliche Wachstumsrate nach Formel 2.1 von 0,2 %. Berechnet man an Hand dieses Wachstums die Gesamtfahrzeugzahl, ergibt sich daraus eine Steigung um 1,4 Mio. Fahrzeuge bis 2020. Anschließend wird in dieser Arbeit von einer Stagnation bis 2050 ausgegangen. Abbildung 2 zeigt die bisherige Entwicklung der Fahrzeugzahlen von 1955 bis 2013 sowie den prognostizierten Verlauf bis 2020.

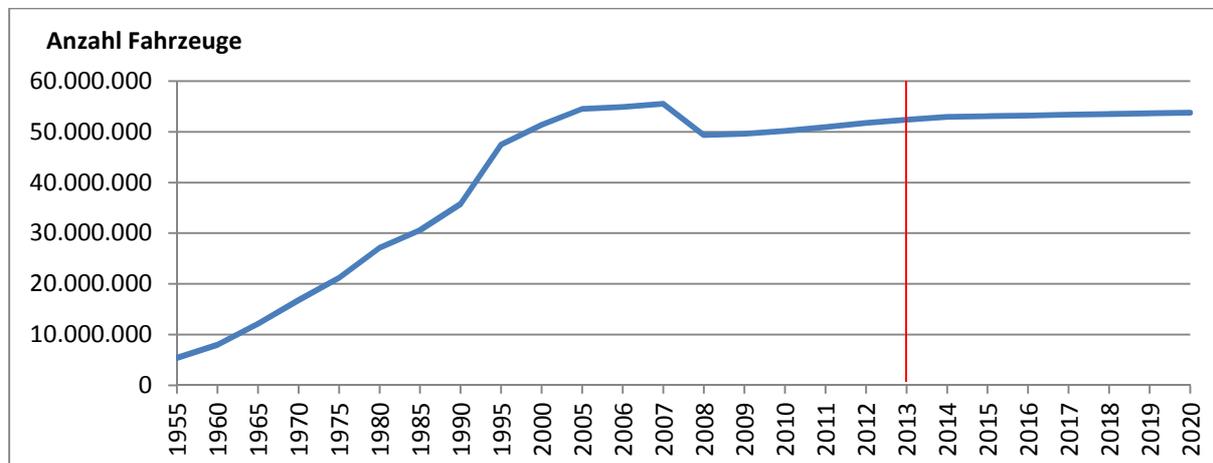


Abbildung 2: Historische und prognostizierte Entwicklung der Fahrzeugzahlen in Deutschland von 1955 bis 2020 (Nach Daten von [KBA14], [BER14])

Da die Gesamtfahrzeugzahl nach 2020 stagnieren soll, wird hier eine Deckelung bei der zuvor errechneten gerundeten Anzahl von 55 Mio. Fahrzeugen eingeführt.

Diese Begrenzung wird mit Hilfe der Logistischen Funktion realisiert (siehe Formel 3.3). Dabei wird der Anfangswert vom Grenzwert abgezogen und durch den Anfangswert geteilt, sodass der Endwert die Grenze nie erreicht, sondern die Differenz zwischen Grenz- und Endwert nur immer geringer wird. In die Berechnung fließt die jährliche Wachstumsrate und die Differenz zwischen Anfangs- und Zieljahr ein, um die Anzahl der Fahrzeuge bis zum Grenzwert jährlich zu steigern [OPP03].

$$M \cdot \frac{\frac{A_{t_0}}{M-A_{t_0}} e^{r \cdot N}}{1 + \left(\frac{A_{t_0}}{M-A_{t_0}} \right) e^{r \cdot N}} = A_t \quad (3.3)$$

- M Grenzwert
- A_t Endwert (letzter verfügbarer Wert)
- A_{t_0} Anfangswert (erster dokumentierter Wert)
- N Jahresdifferenz zwischen Anfangsjahr und Zieljahr ($t_1 - t_0$)
- r Wachstumsrate

Anzahl und Anteil von Elektrofahrzeugen

Nachdem die Entwicklung der Fahrzeugzahl prognostiziert wurde, wird nun das Wachstum der Anzahl an elektronisch betriebenen Fahrzeugen und damit der Anteil an E-Fahrzeugen an der Gesamtmobilität analysiert. Die Anzahl an E-Fahrzeugen in Deutschland hat sich von 2006 bis 2013 fast vervierfacht und beträgt für das Referenzjahr 2013 7.114, was einen Anteil von 0,01 % an der Gesamtfahrzeugzahl ausmacht [KBA14]. Der Shell-Studie nach beläuft sich der Anteil an elektronisch betriebenen Fahrzeugen bis 2030 im Mittel auf etwa 6 % [SHE09]. Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt bis zum Jahr 2020 eine Millionen Elektrofahrzeuge [BUN09] und bis 2050 sechs Millionen Elektrofahrzeuge [BUN14] auf die Straßen Deutschlands zu bringen.

Aus der Entwicklung der Absatzzahlen von 2006 bis 2013, ergibt sich eine jährliche Wachstumsrate von rund 20 %. Wird die Anzahl an Elektrofahrzeugen anhand dieser Steigung bis zum Jahre 2050 fortgerechnet, kann eine Menge von über 7 Mio. Fahrzeugen prognostiziert werden, was die Annahmen der Bundesregierung und der Shell-Studie unterstützt. Auf Grund der hohen Wachstumsrate und der Jahresdifferenz, die als Exponent in die Rechnung einfließt, ergibt sich ein rasantes Wachstum der Elektrofahrzeugzahlen bei steigender Jahreszahl. Abbildung 3 zeigt den tatsächlichen Anstieg der Elektromobilität von 2006 bis 2013 sowie die prognostizierte Entwicklung bis 2050 mit einer Wachstumsrate von 20 %.

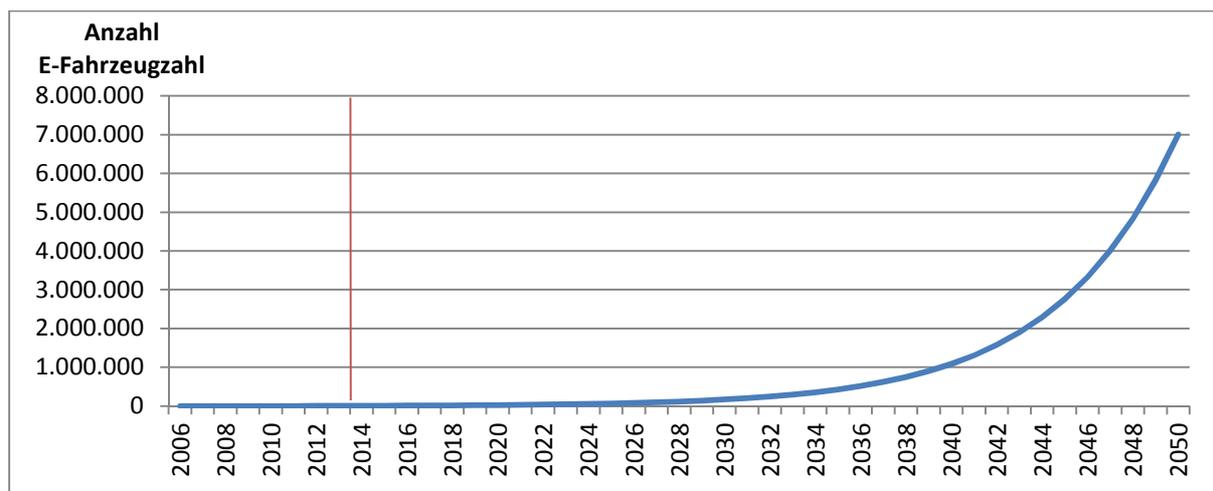


Abbildung 3: Entwicklung der Anzahl an Elektrofahrzeugen von 2006 bis 2050 (Nach Daten von [KBA14])

Im Prognosewerkzeug wird die Anzahl der Elektrofahrzeuge, auf die Anzahl der Gesamtfahrzeuge begrenzt.

Da der Anteil der E-Fahrzeuge stark von der Entwicklung der Gesamtmobilität abhängt wird diese Größe nur anhand der Anzahl der Elektrofahrzeuge errechnet. Es ist dem Anwender jedoch möglich statt einer Zahl der E-Fahrzeuge, einen Anteil an der Gesamtfahrzeugzahl anzugeben woraus die Anzahl an Elektrofahrzeugen kalkuliert wird.

Jährliche Fahrstrecke

Die jährliche Fahrstrecke eines Fahrzeugs wird in [SHE09] als rückläufig betrachtet. Betrug die durchschnittliche Fahrstrecke in 2001 noch 13.100 km/Pkw, ist sie bis 2007 auf 12.500 km/Pkw gesunken. Es wird davon ausgegangen, dass sich dieser Trend fortsetzt, da mit einer geringeren Nutzung des

einzelnen Fahrzeugs bei steigender Fahrzeugzahl gerechnet wird. Außerdem wird angenommen, dass öffentliche Verkehrsmittel stärker genutzt werden. Bis zum Jahr 2020 soll ein Fahrzeug damit nur noch 11.900 km im Jahr zurücklegen.

In der Studie [BUN06] dagegen wird die jährliche Fahrstrecke bis 2050 als konstant betrachtet bzw. je nach Szenario als leicht sinkend.

In dieser Arbeit wird mit einem leichten Rückgang der Fahrtstrecke um jährlich 0,2 % nach [SHE09] gerechnet. Dies ergibt sich aus der Reduktion von ehemals 12.500 km in 2007 und den prognostizierten 11.900 km in 2020 nach Formel 2.1. Demnach lässt sich mit Hilfe der Wachstumsrate eine jährliche Fahrstrecke von 12.343 km pro Pkw für das Referenzjahr 2013 vorhergesagt, was einer täglichen Strecke von etwa 34 km entspricht.

Verbrauch eines Elektrofahrzeugs

Der Verbrauch eines Elektrofahrzeugs ist stark vom Fahrzeugtyp, der individuellen Fahrweise, den Straßen- und Verkehrsbedingungen und den Außentemperaturen abhängig. Außerdem variiert der Verbrauch durch zusätzliche Verbraucher wie Klimaanlage, Beleuchtung oder Radio [BER14].

Für diese Arbeit wird ein Strombedarf von rund 20 kWh/100 km angenommen, wie aus der Monografie von Bertram und Bongard aus dem Jahr 2014 hervorgeht und in der Dissertation von Agsten aus dem Jahr 2012 ermittelt wurde [BER14], [AGS12].

Zusammenfassend zeigt Tabelle 2 alle ermittelten Variablen für die zu Beginn aufgestellte Gleichung 3.2.

Tabelle 2: Variablen der Gleichung $N \cdot V \cdot s = E$ für den Teilbereich Mobilität

	Wachstumsrate	Referenzjahr 2013
Anzahl Kraftfahrzeuge	0,2 %	52.391.012 Fahrzeuge
Anzahl E-Fahrzeuge	20 %	7.114 Elektrofahrzeuge
Fahrleistung	-0,2 %	12.343 km/a
Verbrauch		20 kWh/100 km

3.2.2 Wärmeerzeugung

Nachfolgend wird aufgezeigt, welchen Anteil Wärme am Endenergieverbrauch ausmacht. Anschließend wird erörtert welche Bereiche des Wärmebedarfs durch Wärmepumpen substituiert werden können, um eine Übersicht über die Potenziale zu geben. Da die Datenlage zur Bestimmung des Strombedarfs für jeden Sektor jedoch sehr lückenhaft ausfällt, wird hier von einem Bottom-up Verfahren abgesehen und stattdessen eine Prognose des Bundesverbands Wärmepumpen e.V. herangezogen, die eine Prognose zu Einsparmöglichkeiten des Primärenergiebedarfs durch Wärmepumpen gibt.

Wärmepumpen beziehen aus der Umgebungsluft, der Erde oder dem Grundwasser Wärme und machen sie für den Heizbedarf nutzbar. Zur Umsetzung der Außentemperatur auf das Heizniveau wird Strom benötigt, der jedoch nur einen Bruchteil der gewonnenen Wärmeenergie ausmacht. Um den Wirkungsgrad einer Wärmepumpe darzustellen, wird die Jahresarbeitszahl (JAZ) verwendet. Diese

gibt Aufschluss über die Effizienz einer Wärmepumpe und sollte derzeit im Schnitt nicht unter 4 liegen. Sie sagt aus, dass die Wärmepumpe $\frac{1}{4}$ der umgesetzten Energie zum Eigenbetrieb benötigt [BON12]. Der Wirkungsgrad der Wärmepumpe ist dabei größer, je geringer die Temperaturdifferenz zwischen Quelltemperatur und Heiztemperatur ist. Es wird deshalb eine maximale Heiztemperatur von 55 °C empfohlen. Dieser Temperaturbereich trifft auf die Bedarfsgebiete Raumwärme und Warmwasser zu [BON12]. Spezielle Hochtemperaturwärmepumpen erreichen inzwischen Temperaturen bis zu 95 °C [OCH14], [ENE14b], wodurch auch der Bereich der Prozesswärme abgedeckt werden könnte. Diese Pumpen lassen sich auf Grund der hohen Anschaffungskosten jedoch nur bei durchgehenden Betriebszeiten wirtschaftlich betreiben, weshalb sie nur für Industrieanwendungen ausgelegt werden [BON12]. Grundsätzlich lassen sich demnach Raumwärme und Warmwasser im Bereich der Haushalte und GHD durch Wärmepumpen ersetzen, genau wie die Prozesswärme durch Hochtemperaturwärmepumpen im Industriesektor.

Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme machten 2011 mit einem Energiebedarf von etwa 1.301 TWh rund 54 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland aus. Bestimmend für die Raumwärme ist dabei der Bedarf durch private Haushalte, während die Prozesswärme vornehmlich durch den Industriesektor beansprucht wird [BMW14]. Der hohe Anteil durch Raum-, Prozesswärme und Warmwasser macht deutlich, welch enormes Einsparpotenzial die Substitution durch Wärmepumpen birgt.

Berechnung

Da der Strombedarf einer Wärmepumpe stark von der Betriebsart, dem Temperaturbedarf und der benötigten Energiemenge abhängt und diese Parameter nicht zur Verfügung stehen, wird hier keine Aussage über die Bottom-up Methode getroffen. Stattdessen wird an dieser Stelle die Prognose des Bundesverband Wärmepumpen e.V. zu Hilfe genommen. Darin werden zwei Szenarien bis zum Jahre 2030 dargestellt und die dadurch möglichen Primärenergieeinsparungen untersucht. Die Analyse berücksichtigt dabei die Art der Gebäude, den Sanierungsanteil sowie die steigende Anzahl an Wohneinheiten trotz sinkender Bevölkerungszahl. Zudem werden die Austauschrate der Heizungsanlagen und die sinkende Volllaststundenzahl auf Grund der erhöhten Dämmungsrate in der Berechnung erfasst. Als besonders schwerwiegendes Kriterium werden die politischen Rahmenbedingungen und die Energiepreisentwicklung gesehen. In der Studie wird aufbauend auf den Einsparungen im Jahr 2010 eine Abschätzung des Einsparpotenzials bis 2020 gemacht. Es wurde ermittelt, dass durch den Einsatz von Wärmepumpen in 2010 4 TWh an Primärenergie eingespart wurden. Je nach Szenario wird daraus geschlossen, dass bis zum Jahr 2020 eine Einsparung von im Mittel 167 TWh Primärenergie möglich wären [BUN13]. Daraus lässt sich eine Wachstumsrate von jährlich 15 % nach Formel 2.1 errechnen. Über den Anteil der Einsparung am Primärenergieverbrauch, der 0,1 % ausmacht, kann die eingesparte Menge am Endenergieverbrauch bestimmt werden, die damit rund 0,8 TWh entspricht. Über die durchschnittliche Jahresarbeitszahl (JAZ) einer Wärmepumpe, die hier mit 4 angenommen wird, kann der Strombedarf durch Wärmepumpen in 2010 ermittelt werden. Das heißt, es wird davon ausgegangen, dass nur ein Viertel der genutzten Energie durch Strom bereitgestellt werden muss, was eine Einsparung von 75 % des Endenergiebedarfs impliziert. Es wird daher nach Formel 3.6 berechnet, wie viel Strom in 2010 für Wärmepumpen benötigt wurde [BON12].

$$E_{Nutz} \cdot \left(1 - \frac{1}{JAZ}\right) = E_{Spar} \quad (3.4)$$

$$E_{Nutz} \cdot \frac{1}{JAZ} = E_{Strom} \quad (3.5)$$

Daraus ergibt sich durch Umstellung der Formel 3.5 nach E_{Nutz} und Einsetzen in Formel 3.4:

$$\frac{E_{Spar}}{JAZ-1} = E_{Strom} \quad (3.6)$$

An Hand der ermittelten Wachstumsrate und einem Strombedarf in 2010 von 0,25 TWh lässt sich mit Formel (2.1) ein Strombedarf durch Wärmepumpen im Referenzjahr 2013 von rund 0,4 TWh errechnen.

3.3. Netzverluste

Bei dem Transport von elektrischer Energie über ein Stromnetz, kommt es physikalisch bedingt zu Verlusten, das heißt, dass nicht alle eingespeiste Energie entnommen werden kann. Die Netzverluste als Energiemenge ergeben sich daher aus der Differenz von Einspeisung und Entnahme. Um die benötigte Strommenge zur Deckung des Energiebedarfs zu prognostizieren, muss die Menge an Netzverlusten aufgerechnet werden. Im Rahmen des Projektes e-highway 2050 wurden europaweit Netzverluste zwischen 1,8 % und 15,7 % festgestellt. Bis zum Jahre 2050 wird eine Verbesserung um durchschnittlich 0,4 % vorhergesagt, was einer jährlichen Wachstumsrate von 0,15 % entspricht [EH114]. In diesem Fall wurde für die Netzverluste ein Anteil von 4 % veranschlagt, der vom betreuenden Übertragungsnetzbetreibers Amprion empfohlen wurde. Rund 3 % der Verluste entstehen demnach im Verteilnetz und etwa 1 % der Verluste im Übertragungsnetz. Die dadurch entstehende Energiemenge errechnet sich aus Multiplikation des Prozentsatzes mit der Summe der benötigten Strommenge durch den derzeitigen Bedarf, Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen (Formel 3.7). Für das Referenzjahr 2013 ergibt sich daraus ein Strombedarf von rund 21 TWh durch transportbedingte Verluste. Eine Reduktion der Netzverluste wird nach [EH114] um jährlich 0,15 % veranschlagt.

$$E_{Verluste} = p_{Verluste} \cdot (E_{derzeitiger\ Bedarf} + E_{E-Fahrzeuge} + E_{Wärmepumpen}) \quad (4.7)$$

4. Bestimmung des Strombedarfs nach Einflussparametern

Bei dieser Methode wird die Entwicklung des Strombedarfs anhand verschiedener Einflussparameter untersucht. Dazu wird die Relevanz ausgewählter Parameter auf den Verlauf jedes Bedarfssektors geprüft. Das Projekt e-highway 2050 hat dafür die einflussreichsten Parameter, das Bruttoinlandsprodukt und die Bevölkerungsentwicklung, herausgegriffen und den Strombedarf an den Verlauf dieser Faktoren gekoppelt [EH114]. Außerdem hat der Verband Schweizer Elektrizitätsunternehmen eine Untersuchung angestellt, in der sich ebenfalls das Bruttoinlandsprodukt und die Bevölkerungsentwicklung als wichtigste Einflussparameter herauskristallisierten. Außerdem spielen nach Aussage des Verbandes der Klimawandel, das Verbraucherverhalten, die Stromeffizienz sowie die Substitution fossiler Energieträger durch Stromanwendungen eine Rolle [VER12]. Abbildung 4 zeigt den Zusammenhang zwischen Bruttoinlandsprodukt, Bevölkerungszahl und Strombedarf in der Schweiz anhand des Index 1995=100. Die Grafik zeigt, dass die Parameter in der Schweiz einen ähnlichen Verlauf

aufweisen. Es kann daraus geschlossen werden, dass die Entwicklung des Schweizer Strombedarfs in direktem Zusammenhang zu deren Bruttoinlandsprodukt bzw. deren Bevölkerungsentwicklung stehen. Es zeigt sich allerdings auch, dass der Strombedarf seit 2007 eine geringere Steigung als BIP und Bevölkerungszahl aufweist und sich daher möglicherweise vom Einfluss dieser Parameter löst.

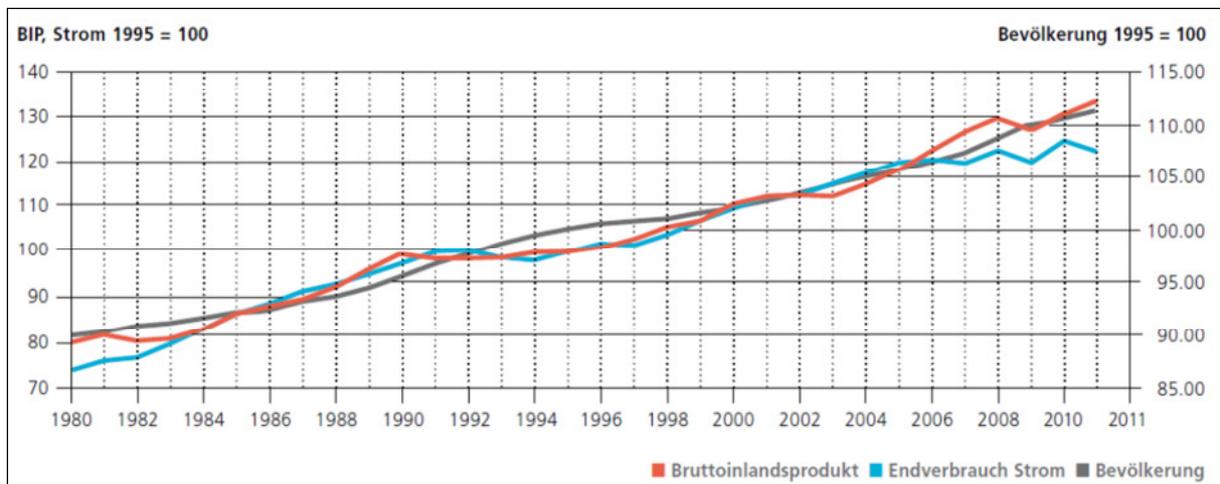


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Bruttoinlandsprodukt, Bevölkerung und Strombedarf der Schweiz [VER12]

In dieser von Amprion betreuten Arbeit werden nur die Einflüsse von Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung untersucht. Amprion ist am Projekt e-highway 2050 beteiligt, in dem diese Parameter bereits als die einflussreichsten identifiziert wurden.

4.1. Derzeitiger Strombedarf in Abhängigkeit des Bruttoinlandsproduktes

Das Bruttoinlandsprodukt gibt das wirtschaftliche Wachstum eines Landes an. Es ist seit 1991 stetig gestiegen und erlitt nur in 2009, im Jahr der Wirtschaftskrise, einen leichten Einbruch [STA14]. Im Referenzjahr 2013 ist das Bruttoinlandsprodukt bis auf 2.738 Mrd. Euro angewachsen und weist damit eine jährliche Wachstumsrate nach Formel 2.1 von 2,7 % auf. Abbildung 5 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Bruttoinlandsprodukt und den Strombedarfssektoren Deutschlands.

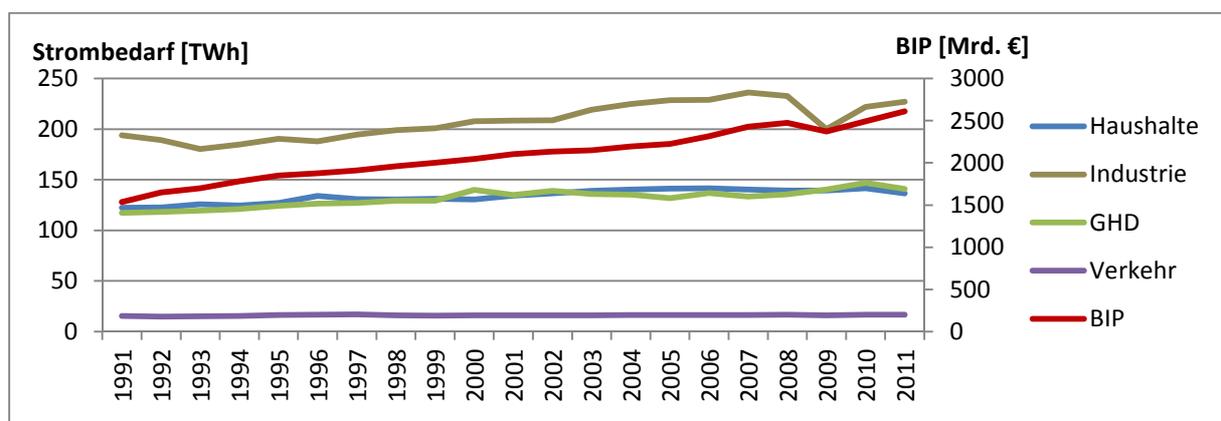


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen Bruttoinlandsprodukt und Strombedarf (Nach Daten von [STA14])

Anschließend wird die Korrelation zwischen Bruttoinlandsprodukt und jedem Sektor des Strombedarfs untersucht. Dafür wird der spezifische Strombedarf durch Division des jeweiligen Bedarfssektors durch das Bruttoinlandsprodukt in jedem Jahr berechnet. Um die Vergleichbarkeit innerhalb der Sektoren

sowie zwischen den Einflussparametern zu gewährleisten, wird ein Index von 1991=100 gebildet. So wird es möglich den tatsächlichen Verlauf des jeweiligen Sektors ins Verhältnis zu setzen und verhindern, dass die Menge des Verbrauchers den Einfluss bestimmt. Wird anschließend der spezifische Strombedarf in jedem Jahr nach Formel 2.2 gebildet, lässt sich daraus der Mittelwert nach Formel 2.3 berechnen. Aus den einzelnen Quotienten kann mit Hilfe des Mittelwertes dann eine Standardabweichung nach Formel 2.4 errechnet werden. Die Standardabweichung gibt die Fluktuation einer Zeitreihe um den Einflussparameter an. Je geringer die Abweichung ist, desto größer ist die Affinität der beiden Verläufe [MEY02]. Die Standardabweichung hat üblicherweise die gleiche Einheit wie der spezifische Strombedarf, also Stromverbrauch geteilt durch Bruttoinlandsprodukt. Da in diesem Fall mit einem Index gearbeitet wurde, wird die Standardabweichung hier in Prozent angegeben. Tabelle 3 zeigt die errechnete Standardabweichung zu einem parallelen Verlauf zwischen den Sektoren und dem Einflussparameter Bruttoinlandsprodukt.

Tabelle 3: Standardabweichung des spezifischen Strombedarfs in Abhängigkeit des Bruttoinlandsproduktes

Bedarfssektor	Standardabweichung σ
Haushalte	10 %
Industrie	8 %
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	9 %
Verkehr	13 %

Beim Vergleich der errechneten Standardabweichungen, zeigen sich Differenzen von ein bis fünf Prozent zwischen den Bedarfssektoren. Der Strombedarf durch Haushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen und die Industrie zeigen eine ähnliche Affinität zum Einflussparameter Bruttoinlandsprodukt. Lediglich der Sektor Verkehr weist eine höhere Abweichung zur durchschnittlichen Parallelität zwischen dem Strombedarf öffentlicher Verkehrsmittel und dem Bruttoinlandsprodukt auf. Die Auswertung der Häufigkeitsverteilung wird nachfolgend an Hand des Sektors mit der höchsten Affinität zum Bruttoinlandsprodukt gezeigt. Abbildung 6 zeigt die Häufigkeit der Quotienten aus dem Index des Strombedarfs der Industrie und dem Bruttoinlandsprodukt in einem Histogramm sowie die Normalverteilung der Zeitreihe anhand des Mittelwertes und der Standardabweichung. Die grafischen Darstellungen des Einflusses des Bruttoinlandsproduktes auf den Strombedarf durch Haushalte, GHD und Verkehr sind in Anhang 1 ersichtlich.

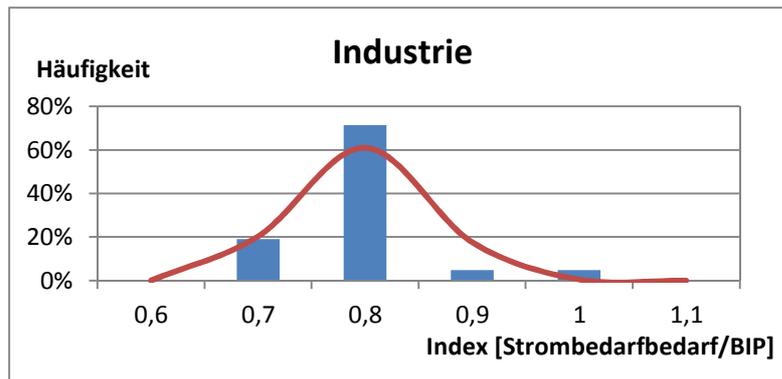


Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung des Quotienten aus dem Index des Strombedarfs der Industrie geteilt durch den Index des Bruttoinlandsproduktes

Nun kann mit Hilfe des errechneten Mittelwertes eine Prognose des zukünftigen Strombedarfs in Abhängigkeit des Bruttoinlandsproduktes nach Formel 2.5 erfolgen.

Betrachtet man jedoch die zeitliche Entwicklung des spezifischen Stromverbrauchs aller Bedarfssektoren (Anhang 1: Tabelle 10), fällt ein kontinuierlich sinkender Trend auf, da das Bruttoinlandsprodukt schneller steigt als der Strombedarf. Die wachsende Divergenz zwischen Stromverbrauch und Bruttoinlandsprodukt wird bei Darstellung des Index beider Größen in Abbildung 7 offensichtlich.

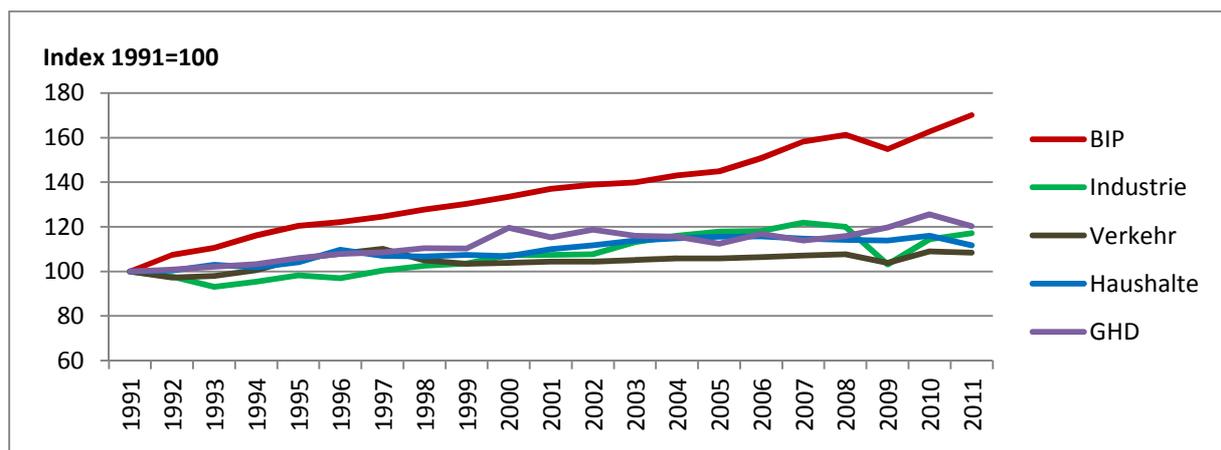


Abbildung 7: Divergenz von Bruttoinlandsprodukt und Strombedarfssektoren

Um die Divergenz zwischen Bruttoinlandsprodukt und Stromverbrauch in der Prognose zu berücksichtigen, wird die Entwicklung des spezifischen Stromverbrauchs durch die Wachstumsrate nach Formel 2.1 für jeden Bedarfssektor errechnet. Wird davon ausgegangen, dass sich dieser Trend weiter fortsetzt, kann in Formel 2.5 statt des Erwartungswertes die Wachstumsrate zusammen mit dem spezifischen Strombedarf eingesetzt werden. Daraus ergibt sich für die Prognose des Stromverbrauchs in Abhängigkeit des Bruttoinlandsproduktes Formel 4.1.

$$\underbrace{[A_{\text{spez.Strom},t_0} \cdot (1 + r_{\text{spez.Strom}})^N]}_{\text{Erwartungswert}} \cdot \underbrace{[A_{\text{BIP},t_0} \cdot (1 + r_{\text{BIP}})^N]}_{\text{Bruttoinlandsprodukt}} = P_{\text{Strom}} \quad (4.1)$$

An Hand dieser Berechnung lässt sich eine Vorhersage des Stromverbrauchs bis zum Jahre 2050 für den Bedarfssektor der Haushalte von 167 TWh, für den Industriesektor von 305 TWh, für den Verbrauch durch Gewerbe, Handel und Dienstleistungen von 199 TWh und für den Bedarf des öffentli-

chen Verkehrs von 19 TWh treffen. Abbildung 8 zeigt den bisherigen Verlauf sowie die weitere Entwicklung aller Bedarfssektoren in Abhängigkeit des Bruttoinlandsproduktes von 1991 bis 2050.

Die Prognose erzeugt einen relativ steilen, fast linearen Anstieg des Strombedarfs in fast allen Sektoren. Der Industriebedarf steigt demnach bis 2050 auf über 300 TWh, nur der Verbrauch durch den Verkehrssektor lässt fast keine Steigung erkennen.

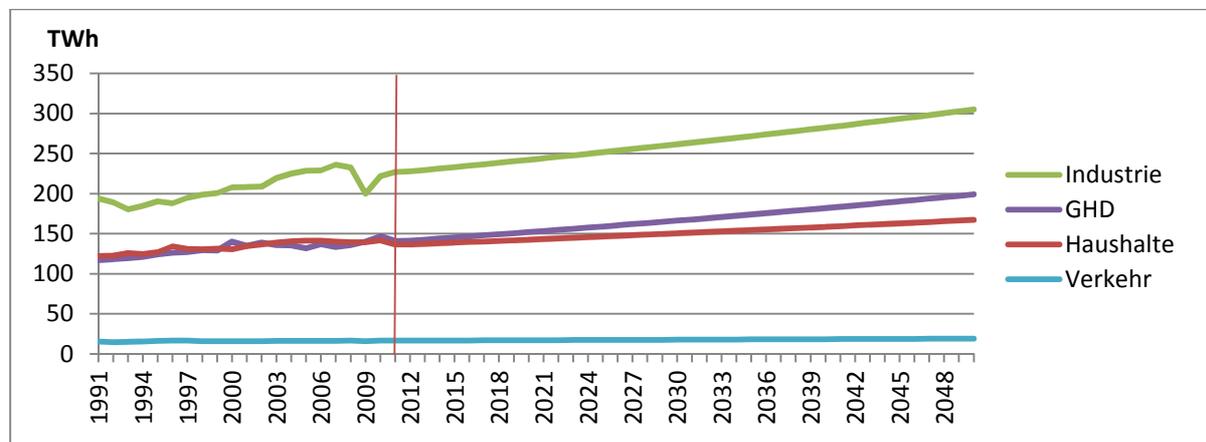


Abbildung 8: Historischer und prognostizierter Verlauf des Strombedarfs in Abhängigkeit des Bruttoinlandsproduktes

4.2. Derzeitiger Strombedarf in Abhängigkeit der Bevölkerungszahl

Die Bevölkerungsentwicklung ist ein prägnantes Indiz über den Verlauf des Strombedarfs. So kann davon ausgegangen werden, dass mehr Menschen auch mehr Strom benötigen. Die Bevölkerung Deutschlands ist von 1950 bis 2002 kontinuierlich bis zu einem Maximum von 82,5 Mio. Einwohnern gewachsen. Seit dem ist ein leichter Rückgang der Bevölkerungszahl zu verzeichnen [DES14a]. Der rückläufige Trend in der Bevölkerungsentwicklung, wird sich laut einer Prognose des Statistischen Bundesamtes auch in Zukunft weiter fortsetzen. Darin wird davon ausgegangen, dass sich die Zahl der Einwohner bis zum Jahre 2060, je nach Szenario auf etwa zwischen 64 Millionen und 77 Millionen reduzieren wird. Die Prognose berücksichtigt dabei die sinkende Geburtenrate, die steigende Lebenserwartung sowie den Wanderungssaldo. Es wurden dazu zwölf Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen kreiert und untersucht. Im Mittel ergibt sich daraus ein Rückgang der Bevölkerungszahlen um jährlich 0,3 %. Danach lässt sich für das Referenzjahr 2013 nach Formel 3.1 eine Einwohnerzahl von rund 81 Mio. kalkulieren. Abbildung 9 zeigt den bisherigen Zusammenhang zwischen Bevölkerungszahl und Strombedarf in Deutschland von 1990 bis 2011.

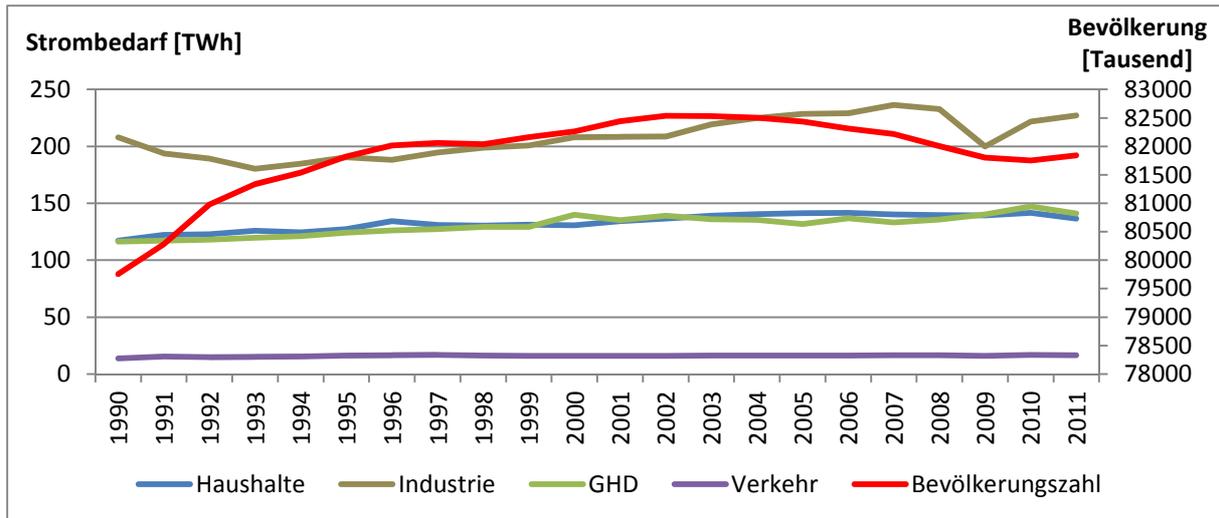


Abbildung 9: Zusammenhang zwischen Strombedarf und Bevölkerungszahl (Nach Daten von [DES14a])

Um einen soliden Zusammenhang zwischen Strombedarf und Bevölkerungsentwicklung herstellen zu können, wird nachfolgend jeder Bedarfssektor auf seine Affinität zu diesem Parameter geprüft. Dafür wird der spezifische Strombedarf jedes Sektors durch Division des Strombedarfs durch die Bevölkerungsanzahl jedes Jahres errechnet und gegen die Häufigkeit aufgetragen. Um die Vergleichbarkeit aller Werte zu gewährleisten, wird dafür ein Index verwendet. Das heißt, alle Bedarfssektoren werden auf den Index 1990=100 gesetzt. Zusätzlich wird auch die Bevölkerungszahl diesem Index unterzogen, damit auch die Vergleichbarkeit innerhalb der Einflussparameter gegeben ist. Tabelle 4 zeigt die Standardabweichung des spezifischen Strombedarfs in Abhängigkeit der Bevölkerungszahl.

Tabelle 4: Standardabweichung des spezifischen Strombedarfs in Abhängigkeit der Bevölkerungszahl

Bedarfssektoren	Standardabweichung σ
Haushalte	6 %
Industrie	8 %
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	6 %
Verkehr	5 %

Abbildung 10 zeigt die Normalverteilung des spezifischen Verkehrsbedarfs. Dieser Verbraucher zeigt die geringste Abweichung von einem parallelen Verlauf zwischen Strombedarf und Einwohnerzahl, weshalb die Häufigkeitsverteilung und Standardabweichung an diesem Sektor in Form eines Histogramms veranschaulicht wird. Die grafische Darstellung aller anderen Bedarfssektoren ist in Anhang 2 ersichtlich.

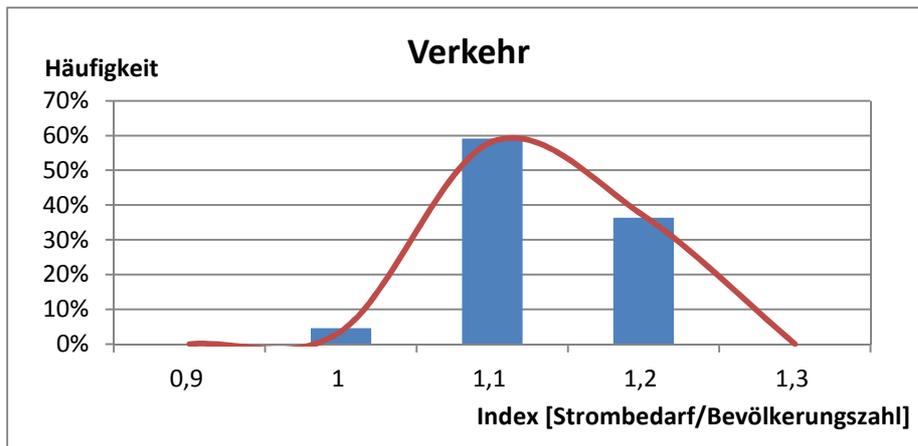


Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung des Quotienten aus dem Index des Strombedarfs des Verkehrs geteilt durch den Index der Bevölkerungszahl

Betrachtet man die Entwicklung aller spezifischen Stromverbräuche und veranschaulicht den Verlauf an Hand des Index von Stromverbrauch und Bevölkerungszahl mit 1990=100, zeigt sich auch hier, vor allem im Sektor Haushalte und GHD eine Divergenz zwischen Bedarf und Einwohnerzahl (Abbildung 11). Im Sektor Verkehr und Industrie entsteht eine weniger gradlinige Divergenz, jedoch wächst der spezifische Strombedarf auch in diesen Bereichen um 0,2 bis 0,3 Einheiten (Anhang 2: Tabelle 11). Der Strombedarf wächst im Vergleich zur Bevölkerungszahl schneller, weshalb auch hier die Wachstumsrate des spezifischen Strombedarfs mittels Formel 2.1 für jeden Sektor errechnet wird.

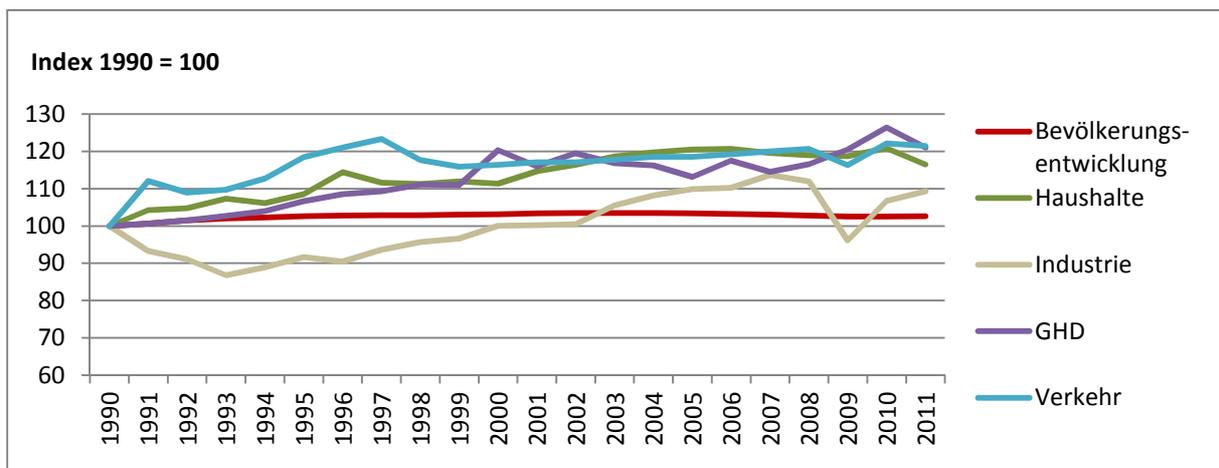


Abbildung 11: Entwicklung von Bevölkerungszahl und Strombedarfssektoren

Mit Hilfe von Formel 4.1 kann nun eine Prognose über den zukünftigen Strombedarf gegeben werden. Aus der Kalkulation ergibt sich für das Jahr 2050 ein Stromverbrauch im Sektor der Haushalte von 151 TWh, für den Industriesektor ein Bedarf von 223 TWh, für den Bedarf von Gewerbe, Handel und Dienstleistung errechnet sich ein Verbrauch von 167 TWh und für den öffentlichen Verkehr 20 TWh. Abbildung 12 zeigt den historischen sowie den prognostizierten Verlauf des Stromverbrauchs in jedem Sektor. Die Vorhersage des Strombedarfs in Abhängigkeit der Bevölkerungszahl, ergibt eine geringfügige Steigung des Verbrauchs bis zum Jahre 2050. Der Bedarf im Industriesektor weist sogar einen leichten Rückgang auf.

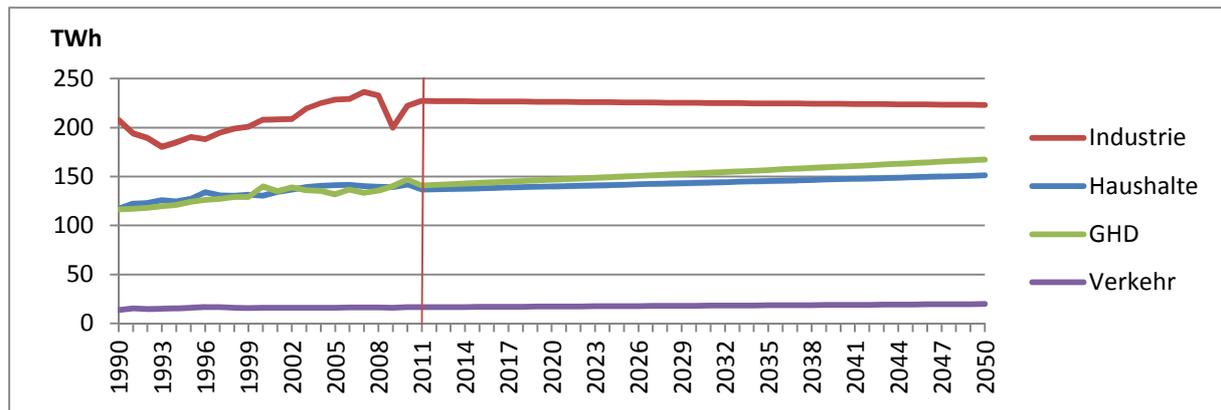


Abbildung 12: Historischer und prognostizierter Verlauf des Strombedarfs in Abhängigkeit der Bevölkerungszahl

4.3. Haushaltsbedarf in Abhängigkeit von Haushaltsgröße, Produkteffizienz und erhöhter Elektrifizierung der Haushalte

Zur Analyse des Strombedarfs der Haushalte wird eine Studie des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. in Kooperation mit der HEA – Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V. herangezogen. Die Energiewende stellt für Deutschland die umweltpolitisch größte Herausforderung des 21. Jahrhunderts dar, so [BDE13]. Die Studie untersucht deshalb den Stromverbrauch im Haushaltsbereich, der nach der Industrie den zweitgrößten Verbraucher Deutschlands ausmacht. Auf Grund des hohen Anteils am Gesamtstrombedarf spielt dieser Sektor bei der Sicherstellung einer zuverlässigen, ökonomischen und ökologischen Energieversorgung in Deutschland eine entscheidende Rolle und rückt dadurch in den Fokus möglicher Einsparpotenziale. Die Entwicklung des Haushaltsbedarfs wird deshalb unter Berücksichtigung verschiedener Einflussparameter betrachtet. Zum einen werden die Bevölkerungsentwicklung sowie der Anteil an Einpersonenhaushalten in die Analyse einbezogen, zum anderen spielen die Gebäudeart und Anwendungsarten des Stromverbrauchs eine Rolle. Außerdem werden die Art der Haushaltsgeräte sowie die Auswirkungen von elektrischen Warmwasserbereitungsanlagen in der Studie untersucht [BDE13].

Für diese Arbeit wird im Folgenden der Einfluss des steigenden Anteils an Einpersonenhaushalten, die Einsparmaßnahmen durch die Bevölkerung, die erhöhte Elektrifizierung von Haushalten sowie die Effizienzsteigerung von Haushaltsprodukten untersucht.

Der Anteil an Einpersonenhaushalten steigt seit 2005 und nahm in 2012 einen Anteil von 41 % ein [DES14c]. Da der Pro-Kopf-Bedarf steigt, je kleiner die Haushaltsgröße ist [BDE13] und dieser Trend auch weiterhin zunimmt [DES14d], wird diese Größe nun genauer analysiert. Einer Prognose des Statistischen Bundesamtes nach, soll der Anteil an Einpersonenhaushalten in Deutschland bis zum Jahre 2030 weiter auf 43 % steigen [DES14d]. Demnach sollte der Strombedarf seit dem Anstieg der Einpersonenhaushalte in 2005 stetig zunehmen. Ungehindert dessen sinkt der Verbrauch jedoch im seit 2006. Abbildung 13 zeigt die Entwicklung des Strombedarfs im Sektor Haushalte und das Wachstum des Anteils an Einpersonenhaushalten von 2000 bis 2012 [DES14c]. Die Grafik veranschaulicht, dass die Entwicklung des Anteils an Einpersonenhaushalten in keinem direkten Zusammenhang mit dem Stromverbrauch im Haushaltssektor steht.

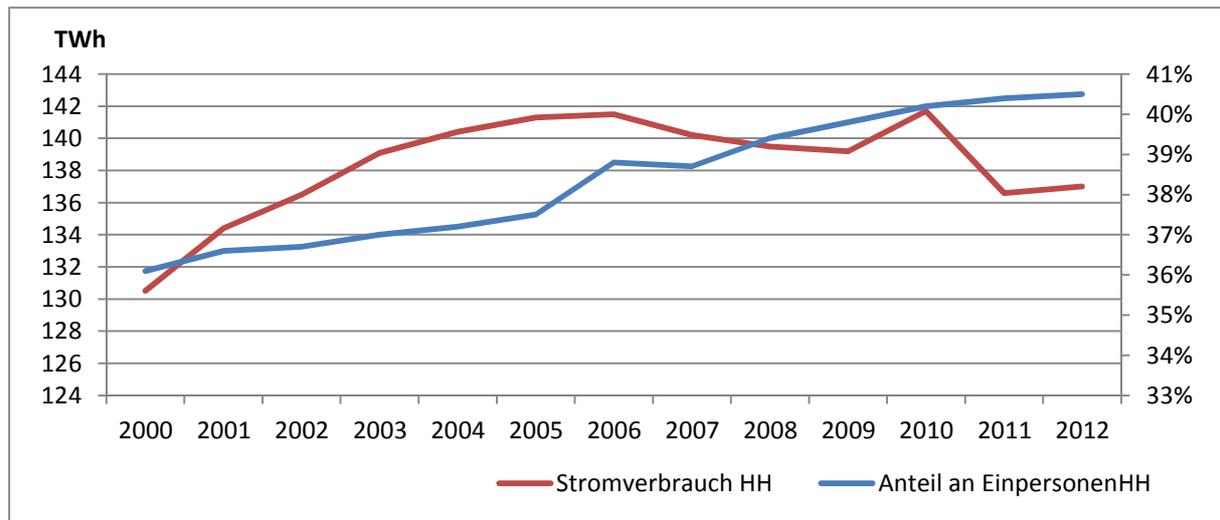


Abbildung 13: Zusammenhang zw. Stromverbrauch in privaten Haushalten und dem Anteil an Einpersonenhaushalten (Nach Daten von [ARB13] und [DES14c])

Auf Grund der stetigen Präsenz von Ressourcenknappheit und Stromsparmaßnahmen und dem Rückgang des Strombedarfs im Sektor der Haushalte, werden nun die Aspekte der Einsparmaßnahmen durch die Bevölkerung, die Effizienzsteigerung von Haushaltsprodukten und die erhöhte Elektrifizierung der Haushalte betrachtet. Abbildung 14 zeigt den Stromverbrauch dieses Sektors nach Anwendungsarten im Vergleich zwischen 1996 und 2011 [BDE13]. Der Strombedarf ist in diesen Jahren trotz der zeitlichen Distanz und der dazwischen liegenden Schwankungen mit etwa 134 TWh in 1996 und rund 137 TWh in 2011 sehr ähnlich [ARB13]. Durch den fast identischen Verbrauch zeigt sich die Verschiebung in der Aufteilung der Anwendungsbereiche noch deutlicher. An Hand von Abbildung 14 werden nachfolgend die Einflüsse durch Einsparmaßnahmen, Effizienzsteigerung und erhöhter Elektrifizierung analysiert.

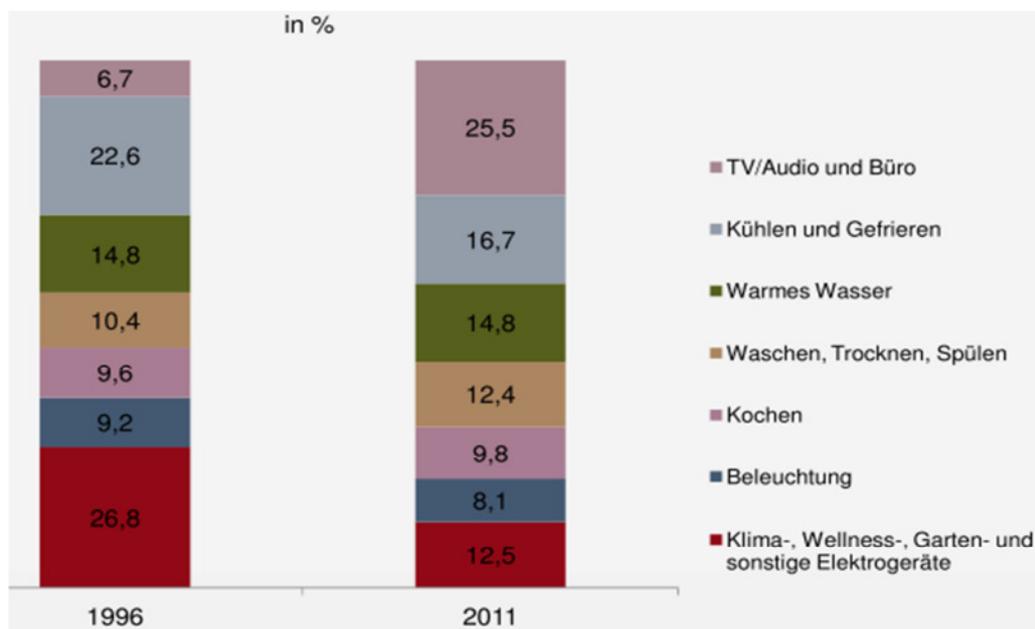


Abbildung 14: Aufteilung des Stromverbrauchs der privaten Haushalte nach Anwendungsarten in 1996 und 2011 [BDE13]

Der Bedarf im Bereich TV/Audio und Büro hat seit 1996 stark zugenommen, was auf eine erhöhte Elektrifizierung der Haushalte zurückzuführen ist. Dieser Bereich beansprucht inzwischen ein Viertel

des Stromverbrauchs, was einen enormen Anstieg der Anzahl an Geräten der Informations-, Kommunikations- und Unterhaltungselektronik zu Grunde hat. Es haben sich zum einen die Gerätevielfalt und zum anderen der Ausstattungsgrad sowie die Geräteanzahl stark erhöht, da viele Geräte inzwischen parallel genutzt werden. Der Bedarf im Bereich Kühlen und Gefrieren hat stark abgenommen, da sich inzwischen zunehmend Energieeffiziente Geräte durchsetzen, was hauptsächlich der Einführung der Energielabels zu verdanken ist. Der Stromverbrauch durch den Sektor Beleuchtung hat leicht abgenommen auf Grund des stufenweisen Auslaufens von ineffizienten Leuchtmitteln durch die europäische Ökodesign Richtlinie. Der Stromanteil für Waschen, Trocknen, Spülen ist leicht gestiegen, da sich die Ausstattung von Haushalten durch Spülmaschinen und Wäschetrocknern von 1996 bis 2011 erhöht hat. Die Effizienzsteigerung kommt derzeit noch nicht gegen diesen Effekt an, was sich jedoch in naher Zukunft noch ändern sollte, wenn ältere Modelle ersetzt werden [BED13]. Es wird deutlich, dass sich die Effekte gegenseitig überlagern, sodass sich Maßnahmen der Stromreduktion und des Anstiegs bisweilen ausgleichen.

4.4. Neue Technologien in Abhängigkeit von Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung

Mathias Bertram und Stefan Bongard haben in ihrer Monografie „Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr“ drei Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Elektromobilität identifiziert. Dabei wird zum einen der energiepolitische und umwelt-, verkehrs- und steuerpolitische Einfluss erörtert und zum anderen der Faktor technische und infrastrukturelle Einflüsse untersucht. Darin werden Ressourcenknappheit und Einsparmaßnahmen der Treibhausgasemissionen sowie Fördermaßnahmen und Akzeptanz in der Bevölkerung fokussiert und diskutiert. In dieser Analyse steht das Verhalten des Menschen im Vordergrund, der auf Maßnahmen der Politik und Industrie reagiert und nach seinem eigenen Vorteil agiert. Die Studie untersucht deshalb, welche Gegebenheiten erfüllt sein müssten, damit sich ein Kunde für ein Elektrofahrzeug entscheidet. Die Nutzerakzeptanz richtet sich vornehmlich nach Alltagstauglichkeit, ökologischen Eigenschaften, Ladeverhalten und Nutzungskosten des Fahrzeuges. In [BER14] werden deshalb die Aktionsmöglichkeiten der Hersteller und der Politik erörtert, die der Elektromobilität zum flächendeckenden Durchbruch verhelfen sollen. Da der Einfluss dieser Parameter sehr schwer herzustellen ist, wird in dieser Arbeit nur untersucht, wie sich der Absatz der Elektromobilität in den letzten Jahren entwickelt hat und wie sich die Korrelation zwischen Bruttoinlandsprodukt bzw. Bevölkerungsentwicklung und Verkaufszahlen von Elektrofahrzeugen verhält.

Dazu wird auch hier die spezifische Fahrzeugzahl durch Division der Anzahl an E-Fahrzeugen durch das Bruttoinlandsprodukt und die Bevölkerungszahl nach Formel 2.2 gebildet. Mit Hilfe des daraus errechneten Mittelwertes (Formel 2.3) lässt sich eine Standardabweichung von 59 % bei Abhängigkeit vom Bruttoinlandsprodukt und 68 % bei Abhängigkeit von der Bevölkerungszahl kalkulieren (nach Formel 2.4). Abbildung 15 zeigt den historischen Verlauf von Bruttoinlandsprodukt, Bevölkerungsentwicklung und Anzahl an Elektrofahrzeugen am Index 2006=100.

Die Elektromobilität befindet sich derzeit in einer Phase der Marktintegrität, weshalb sie einen exponentiellen Anstieg erfährt und keine Parallelität zu den Faktoren Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung zeigt. Es ist zu vermuten, dass bei Sättigung der E-Fahrzeugzahl die weitere Entwicklung wieder Parallelen zu diesen Einflussfaktoren erkennen lässt. Da bis zum Ende des Betrachtungszeitraums 2050 jedoch keine Sättigung absehbar ist, und auf Grund der enormen Abweichung

eines parallelen Verlaufs, zwischen Anzahl an E-Fahrzeugen und beiden Einflussparametern wird in diesem Fall von einer Kopplung des Fahrzeugverkaufs an einen Einflussfaktor abgesehen. Für die Bedarfsberechnung im Prognosetool wird der Trendverlauf nach Kapitel 3.2.1 Mobilitätsentwicklung angenommen.

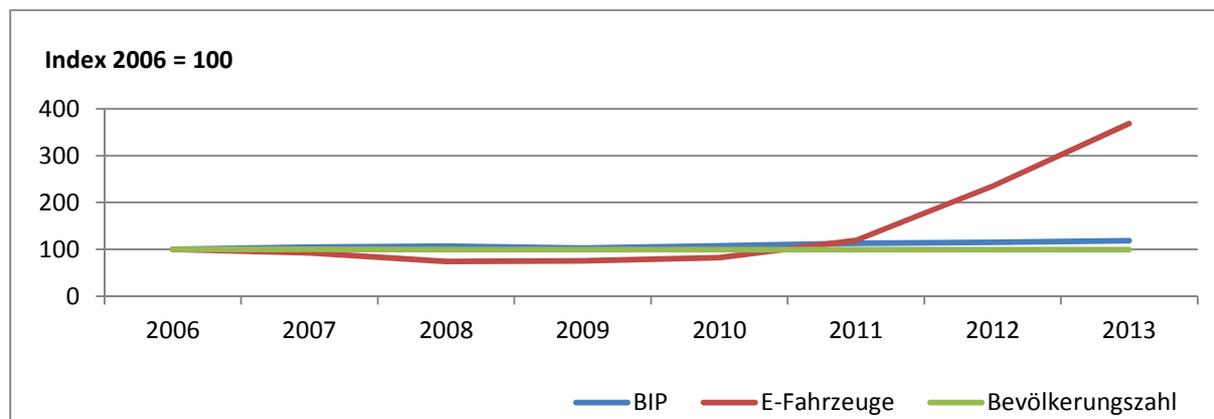


Abbildung 15: Entwicklung von Bruttoinlandsprodukt, Bevölkerungszahl und Anzahl an Elektrofahrzeugen

Für die Prognose des Strombedarfs durch Wärmepumpen liegen keine historischen Daten vor, weshalb eine Analyse zu bisherigen Parallelitäten zwischen den Einflussfaktoren Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung und dem Strombedarf durch Wärmepumpen entfällt. Stattdessen wird im Berechnungswerkzeug die Prognose aus Kapitel 3.2.2 Wärmeerzeugung verwendet.

4.5. Energieeffizienz

Der Faktor Energieeffizienz hat in den letzten Jahren in Deutschland einen immer höheren Stellenwert gefunden. Viele elektronische Geräte sind inzwischen mit Energielabeln versehen und besonders umweltschädliche Produkte sind sogar teilweise verboten [UMW12a]. Auch in Zukunft kann davon ausgegangen werden, dass dieser Parameter weiter an Bedeutung gewinnt und vermehrt in den Fokus der Energiepolitik rückt.

Als Maßstab für die Energieeffizienz eines Landes gibt es unterschiedliche Messgrößen. Häufig wird der Indikator der Energieproduktivität genutzt, der das Verhältnis zwischen eingesetzter Energie und der Produktivität des Landes, an Hand des Bruttoinlandsproduktes, darstellt [BUN12], [UMW12]. Da hier der Stromverbrauch betrachtet wird, wird sich in diesem Fall auf die Stromproduktivität bezogen, die das Verhältnis zwischen Strombedarf und dem realen, preisbereinigten Bruttoinlandsprodukt zeigt [EHI14]. Damit wird ausgesagt, dass bei einem stark wachsenden Bruttoinlandsprodukt und einem geringeren Wachstum des Strombedarfs mehr Nutzen aus dem eingesetzten Strom gezogen werden kann [BUN14a]. Die Stromproduktivität wird auch im Projekt e-highway 2050 verwendet, in dem die Entwicklung des Stromverbrauchs in Europa untersucht wird. Sie errechnet sich nach [BUN12a] aus dem Index des Bruttoinlandsproduktes 2005 = 1000 € geteilt durch Bruttostromverbrauch. Das Wachstum dieses Quotienten wird dann als Effizienz beschrieben. In Deutschland ist die Stromproduktivität von 1990 bis 2012 um jährlich etwa 1 % gestiegen [BUN12a]. In dieser Arbeit wird die Stromproduktivität anhand des Bruttoinlandsproduktes und dem Nettostromverbrauch berechnet. Daraus ergibt sich eine jährliche Wachstumsrate um durchschnittlich 2 %. Diese Expansion ergibt sich dadurch, dass das Bruttoinlandsprodukt schneller steigt, als der Nettostrombedarf. Dieser Trend wird

bereits in Kapitel 4.1, derzeitiger Strombedarf in Abhängigkeit des Bruttoinlandsproduktes, berücksichtigt. Dabei wurde festgestellt, dass sich die Divergenz zwischen Bruttoinlandsprodukt und Stromverbrauch kontinuierlich vergrößert. Grund für die steigende Stromeffizienz sind der Einsatz effizienter Technologien, sowie der bewusstere Umgang der Verbraucher mit Energie. Außerdem steigt der Anteil des stromeffizienten Dienstleistungssektors am Bruttoinlandsprodukt [BUN12a].

Der Faktor Energieeffizienz wird in der Wachstumsrate des spezifischen Strombedarfs aller Sektoren in Abhängigkeit des Bruttoinlandsproduktes berücksichtigt. Der Anwender kann diese Wachstumsrate, die dann als Effizienz beschrieben wird, im Berechnungswerkzeug variieren. Tabelle 5 zeigt die Stromproduktivität aller Bedarfssektoren sowie deren jährliche Steigung. Daraus wird ersichtlich, dass die Effizienz im Verkehrssektor und im Bedarf privater Haushalte am stärksten wächst. Am schwächsten zeigt sich die Steigung der Stromeffizienz im Sektor des Gewerbes, Handels und der Dienstleistungen.

Tabelle 5: Stromproduktivität und deren jährliche Wachstumsrate

	Haushalte	Industrie	GHD	Verkehr
Stromproduktivität 2013 [TWh/Mrd. €]	0,05	0,08	0,05	0,006
Wachstumsrate/Effizienz	-2,1%	-1,9%	-1,7%	-2,2%

4.6. Auswertung

Nachdem nun der Einfluss der beiden wichtigsten Parameter Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungszahl auf alle Bedarfsbereiche des derzeitigen Bedarfs und neuer Technologien geprüft wurden, soll im Folgenden aufgezeigt werden, welche Faktoren den größten Einfluss auf den jeweiligen Verbraucher haben. Da sich die Effekte der Einflussparameter bezogen auf den Haushaltsbedarf gegenseitig ausgleichen, werden diese Faktoren hier nicht mehr berücksichtigt. Tabelle 6 zeigt die Standardabweichungen der jeweiligen Zeitreihen des spezifischen Strombedarfs in Abhängigkeit von Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung. Durch die Gegenüberstellung der Einflussparameter lässt sich die Wirkung auf die Verbrauchersektoren besser einordnen. Die Standardabweichung sagt dabei aus, wie weit die einzelnen Werte des spezifischen Stromverbrauchs von einem parallelen Verlauf zwischen Strombedarf und Einflussparameter entfernt liegen. Je höher die Fluktuation der Datenreihe ist, desto geringer ist die Abhängigkeit des Strombedarfs von einem Parameter. Der Einfluss soll zusätzlich durch Pluszeichen verdeutlicht werden. Dabei drücken drei Zeichen einen hohen Einfluss des Faktors auf den jeweiligen Bedarfssektor aus und ein Zeichen eine schwache Parallelität zwischen Einflussparameter und Strombedarf.

Tabelle 6: Abweichung der Zeitreihe vom parallelen Verlauf zwischen Bedarfssektor und dem jeweiligen Einflussparameter

Bedarfssektor	Bruttoinlandsprodukt		Bevölkerungsentwicklung	
	Standardabweichung	Einfluss	Standardabweichung	Einfluss
Haushalte	10 %	+	6 %	+++
Industrie	8 %	++	8 %	++
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	9 %	++	6 %	+++
Verkehr	13 %	+	5 %	+++

Es zeigt sich eine höhere Affinität fast aller Bedarfssektoren zur Bevölkerungsentwicklung. Nur im Falle des Industrieverbrauchs verhält sich die Parallelität zu Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungszahl gleich. Der Bedarf durch GHD ähnelt nur geringfügig mehr dem Verlauf der Bevölkerungszahl als dem des Bruttoinlandsproduktes. Lediglich der Bedarf durch Haushalte und den Verkehr weisen eine eindeutigere Affinität zur Bevölkerungszahl auf. Um nun beide Einflussparameter in der Prognose zu berücksichtigen, wird eine Gewichtung des Einflusses der Faktoren eingeführt. Dazu wird die Summe der prozentualen Abweichungen gebildet und der Anteil des jeweiligen Faktors bestimmt (Anhang 3). Dadurch erhält eine kleine Standardabweichung einen geringen Anteil an der Gesamtabweichung und eine große Standardabweichung macht dann einen großen Anteil an der Gesamtfluktuation aus. Um für weitere Berechnungen, den Parametern mit größerem Einfluss und damit einer geringeren Standardabweichung eine stärkere Gewichtung zuzuschreiben, wird der prozentuale Anteil der Faktoren entsprechend umgedreht. Dadurch wird Parametern mit hoher Parallelität auf einen Bedarfssektor ein größerer Einfluss auf die Entwicklung des Stromverbrauchs gewährleistet. Daraus ergibt sich eine Gewichtung für die Prognose des Haushaltsbedarfs von 38 % nach Verlauf des Bruttoinlandsproduktes und 62 % nach Entwicklung der Bevölkerungszahl. Für die Vorhersage des Industriebedarfs ergibt sich ein Einfluss von 50 % zu 50 % von BIP und Bevölkerungszahl. Für den Sektor GHD wird eine Gewichtung von 60 % nach Bevölkerungszahl und 40% nach Bruttoinlandsprodukt und für den Bedarf durch öffentliche Verkehrsmittel ein Anteil von nur 28 % nach Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes und 72 % nach Verlauf der Bevölkerungsentwicklung in der Prognose berücksichtigt. Tabelle 7 zeigt die Gewichtung der Einflussparameter auf den Strombedarf des Haushalts, des GHD, der Industrie und dem Verkehr.

Tabelle 7: Gewichtung des Einflusses durch die Parameter Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung auf die jeweiligen Bedarfssektoren

Bedarfssektor	Bruttoinlandsprodukt	Bevölkerungsentwicklung
Haushalte	38 %	62 %
Industrie	50 %	50 %
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	40 %	60 %
Verkehr	28 %	72 %

Nun kann mit Hilfe des Erwartungswertes und der Gewichtung der Einflussparameter, eine Prognose für die jeweiligen Bedarfssektoren getroffen werden. Dazu ist der Erwartungswert, also der Mittelwert des spezifischen Strombedarfs, der das Verhältnis von Strombedarf zu Einflussparameter beschreibt nötig. Die errechneten jährlichen Wachstumsraten des spezifischen Strombedarfs in Abhängigkeit von Einwohnerzahl und Bruttoinlandsprodukt berücksichtigen außerdem die steigende Divergenz zwischen Strombedarf und Einflussparametern. Zur Beschreibung der Effizienz ist diese Größe im Falle der Berechnung nach Bruttoinlandsprodukt, durch den Nutzer im Prognosewerkzeug variabel. Tabelle 8 zeigt alle errechneten Konstanten und Variablen zur Erstellung einer Prognose jedes Bedarfssektors nach Formel 4.1. Wird außerdem die ermittelte Gewichtung nach Tabelle 7 berücksichtigt, kann eine Berechnung jedes Sektors nach Formel 4.3. erfolgen.

Tabelle 8: Darstellung aller benötigten Konstanten und Variablen für die Prognose des Strombedarfs nach Formel 4.3

	Bruttoinlandsprodukt		Bevölkerungszahl	
Referenzwert 2013	2752 Mrd. Euro		81.130.333	
Jährliche Wachstumsrate	2,7 %		-3,4 %	
Bedarfssektoren	Erwartungswert [TWh/Mrd. €]	Wachstumsrate/ Effizienz	Erwartungswert [TWh/EW]	Wachstumsrate
Haushalte	0,0502	-2,1 %	0,0000017	0,6 %
Industrie	0,0838	-1,8 %	0,0000028	0,3 %
GHD	0,0521	-1,7 %	0,0000017	0,8 %
Verkehr	0,0061	-2,2 %	0,0000002	0,8 %

$$\left[\left(A_{sp.Strom,BIP,t_0} \cdot (1 + r_{sp.Strom,BIP})^N \right) \cdot A_{BIP,t_0} \cdot (1 + r_{BIP})^N \right] \cdot p_{Einfluss,BIP} + \left[\left(A_{sp.Strom,EW,t_0} \cdot (1 + r_{sp.Strom,EW})^N \right) \cdot A_{EW,t_0} \cdot (1 + r_{EW})^N \right] \cdot p_{Einfluss,EW} = P_{Strom} \quad (4.3)$$

$A_{sp.Strom,BIP,t_0}$ Anfangswert des spezifischen Strombedarfs in Abhängigkeit des BIP [TWh/Mrd. €]

$r_{sp.Strom,BIP}$ Wachstumsrate des spezifischen Strombedarfs in Abhängigkeit des BIP

N Jahresdifferenz zwischen Anfangsjahr und Zieljahr ($t_1 - t_0$)

A_{BIP,t_0} Anfangswert des Bruttoinlandsproduktes [Mrd. €]

r_{BIP} Wachstumsrate des spezifischen Strombedarfs in Abhängigkeit der Bevölkerungszahl

$p_{Einfluss,BIP}$ Gewichtung des Einflusses des Bruttoinlandsproduktes [%]

$A_{sp.Strom,EW,t_0}$ Anfangswert des spez. Strombedarfs in Abhängigkeit der Einwohnerzahl [TWh/EW]

$r_{sp.Strom,EW}$ Wachstumsrate des spezifischen Strombedarfs in Abhängigkeit der Einwohnerzahl

A_{EW,t_0} Anfangswert der Einwohnerzahl

r_{EW} Wachstumsrate des spezifischen Strombedarfs in Abhängigkeit der Einwohnerzahl

$p_{Einfluss,EW}$ Gewichtung des Einflusses der Bevölkerungszahl [%]

P_{Strom} Prognosewert des Strombedarfs [TWh]

Die Prognose nach Formel 4.3 ergibt für den Haushaltsbedarf im Jahr 2050 einen Stromverbrauch von etwa 158 TWh, für den Industriebedarf 264 TWh, für den Bedarf durch Gewerbe, Handel, Dienstleistungen 180 TWh und für den Bedarf im Verkehrssektor rund 20 TWh an Strom. Die bisherige und prognostizierte Entwicklung aller Strombedarfssektoren zeigt Abbildung 16.

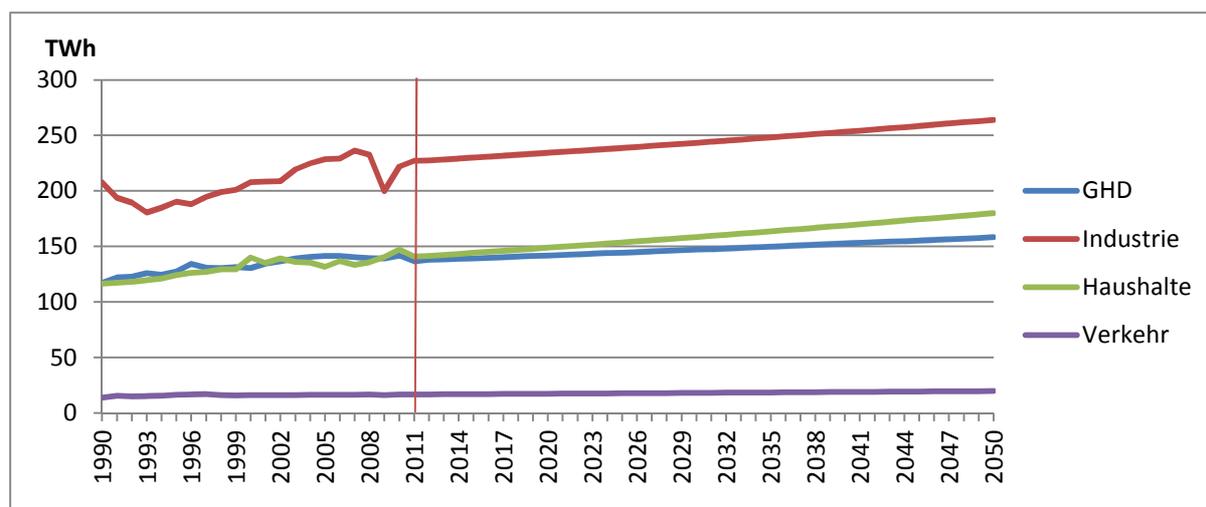


Abbildung 16: Historische und prognostizierte Entwicklung der Strombedarfssektoren nach gewichteter Abhängigkeit von Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung

Die erläuterte Berechnungsweise wurde einem Back-Testing unterzogen, dessen Ergebnisse im Mittel zwischen 2,5 % und 4,6 % von den gemessenen Daten von 1991 bis 2011 abweichen (Anhang 3). Dabei wurde der Strombedarf jedes Sektors mit Hilfe von Formel 4.3 ab dem Jahre 1990/1991 hochgerechnet. Dazu wurde der Anfangswert des spezifischen Stromverbrauchs in Abhängigkeit beider Einflussparameter und deren jährliche Wachstumsraten verwendet. Außerdem wurden der Anfangswert des Einflussparameters und die dazugehörigen Wachstumsraten zusammen mit der ermittelten Gewichtung in die Rechnung integriert. Die Prognose des Haushalts- und GHD-Sektors weist dabei die höchste Genauigkeit mit einer Abweichung von im Schnitt nur 2,5 % bzw. 2,6 % auf. Die Sektoren der Industrie und des Verkehrs haben die höchste Fluktuation zwischen Berechnungswerten und gemessenen Daten mit etwa 4,4 % und 4,6 %.

5. Verwendete Lastprofile

Der ermittelte Strombedarf soll nun in einem Lastprofil dargestellt werden. Dazu gibt es zwei Möglichkeiten. Der Strombedarf kann zum einen in einem tatsächlich gemessenen Profil der Übertragungsnetzbetreiber zum anderen in einem synthetischen Profil eingesehen werden. Das synthetische Profil wurde durch die Addition von Standardlastprofilen und mit Hilfe von Vorlagen erarbeiteten Profilen entwickelt. Standardlastprofile sind für die Sektoren Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Heizungen öffentlich abrufbar. Die Profile für den Bedarf von öffentlichen Verkehrsmitteln, Industrie und dem Laden von Elektrofahrzeugen sind nicht verfügbar und werden mit Hilfe entsprechender Untersuchungen modelliert. Dazu wird zum einen das tatsächliche Lastprofil der Übertragungsnetzbetreiber genutzt, um nach dem Vorgehen einer Untersuchung der Fraunhofer Umsicht, den Industriebedarf mit Hilfe der Standardlastprofile zu extrahieren. Außerdem wird eine Bachelorarbeit mit dem Thema „Modellierung von Fahrprofilen in Matlab/Simulink für elektrische PKW und Plugin-Hybride“ zur Erstellung eines Ladeprofils von Elektrofahrzeugen genutzt. Die Darstellung des zeitlichen Strombedarfs öffentlicher, schienengebundener Verkehrsmittel erfolgt mit Unterstützung des Nahverkehrsexperten der RWTH Aachen Adolf Müller-Hellmann.

In dieser Arbeit werden beide Zeitreihen des Strombedarfs angeboten, so dass der Nutzer einen Vergleich der Darstellungsmöglichkeiten bekommt und selbst entscheiden kann, welches Profil er nutzen möchte.

5.1. Lastprofil der Übertragungsnetzbetreiber

Die Übertragungsnetzbetreiber Amprion, Tennet, 50Hertz und EnBW erfassen kontinuierlich die Stromabnahme im Viertelstundentakt, was eine Zusammensetzung zu einem Jahresprofil ermöglicht. Abbildung 17 zeigt die Summe über vier Einzelprofile der Übertragungsnetzbetreiber von 2011. In diesem Profil werden bereits alle Bedarfssektoren berücksichtigt. Darin inbegriffen sind der Bedarf aus Haushalten und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen sowie auch der Verbrauch durch die Industrie, deren externer Bedarf automatisch erfasst wird. Außerdem wird der Verbrauch durch bisher installierte Wärmepumpen und das Laden von Elektrofahrzeugen in die Messung aufgenommen.

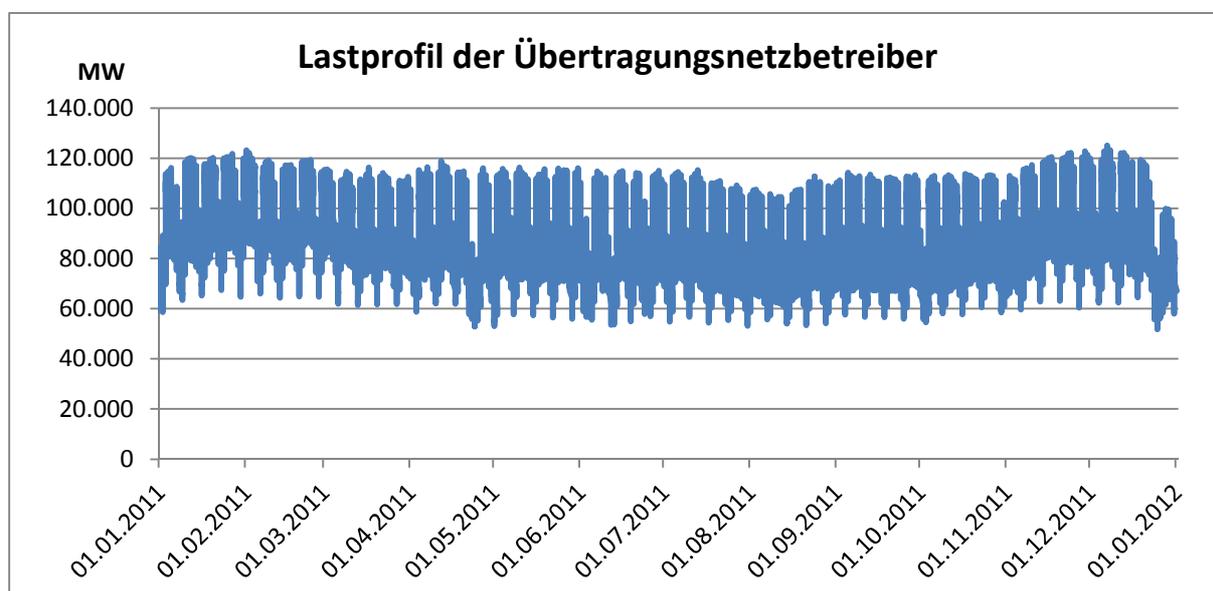


Abbildung 17: Jahresprofil der Übertragungsnetzbetreiber von 2011

5.2. Synthetisches Lastprofil

Für diese Variante werden Standardlastprofile des Basisjahres 2011 verwendet, die im Internet für den Bedarf von Haushalten, Heizungen und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen verfügbar sind. Diese Profile wurden nach BDEW/VDEW gemittelt und skaliert und sind in Anhang 4 einsehbar (Abbildung 28, Abbildung 29, Abbildung 30), [LEC09]. Für den Verkehr, den Industriesektor und Elektrofahrzeuge existiert kein standardisiertes Profil weshalb hier Profile mit Hilfe geeigneter Studien konstruiert werden. Wie die einzelnen Lastzeitreihen erstellt werden, wird nachfolgend erörtert.

5.2.1 Lastprofil des öffentlichen Verkehrs

Zur Erstellung eines Verkehrsprofils wurden stichprobenartig die Fahrpläne des öffentlichen schienengebundenen Regional- und Nahverkehrs in Mainz, Frankfurt und Köln untersucht. Zum öffentlichen schienengebundenen Regionalverkehr zählen Strecken der S-Bahn, Regionalbahn, Intercity (IC), und Intercity-Express (ICE). Zum öffentlichen schienengebundenen Nahverkehr gehört der U-Bahn und Straßenbahnverkehr. Es wurde dabei ein Unterschied zwischen dem öffentlichen schienengebundenen Regional- und Nahverkehr festgestellt. Während S-Bahnen, Regionalbahnen, IC und ICE Wo-

chentags wie Wochenendes einen nahezu identischen Fahrplan verfolgen, werden die Fahrzeiten des U-Bahn und Straßenbahnverkehrs der jeweiligen Nachfrage angepasst. So fahren Straßenbahnen und U-Bahnen am Wochenende nachts länger und tagsüber mit konstantem Einsatz. Die Unterschiede zwischen Samstagen und Sonntagen fielen so inkonsequent aus, dass hier keine Unterteilung vorgenommen wurde. Unter der Woche konnte ein erhöhter Einsatz in den Morgenstunden zwischen 6:00 Uhr und 8:00 Uhr festgestellt werden. Dies deckt sich mit einer Empfehlung des Lehrbeauftragten für das Fach Elektrische Nahverkehrssysteme der RWTH Aachen, Professor Adolf Müller-Hellmann. Dieser rät zu der Annahme einer Auslastung von 85 % der Fahrzeuge im Morgenpeak. Da die Anzahl der Fahrzeuge unbekannt ist, wird in dieser Arbeit von einem maximalen Strombedarf am Morgen ausgegangen und dieses Maximum mit 100 % gekennzeichnet. Es wird außerdem davon ausgegangen, dass im öffentlichen Verkehr keine saisonalen Unterschiede in der Auslastung bestehen. Die Staffelung des Strombedarfs von Montag bis Freitag und am Wochenende wird in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Prozentualer Strombedarf nach Uhrzeiten

Uhrzeit	Wochentag	Uhrzeit	Wochenende
01:00 - 04:00	10%	02:00 - 04:00	15%
04:00 - 06:00	80%	04:00 - 08:00	30%
06:00 - 08:00	100%	08:00 - 19:00	75%
08:00 - 19:00	80%	19:00 - 02:00	30%
19:00 - 01:00	30%		

Das daraus resultierende Jahresprofil für das Jahr 2011 ist im Anhang 4 (Abbildung 31) ersichtlich. Für Feiertage, die in allen Bundesländern oder in mindestens der Hälfte der Fläche Deutschlands gesetzlich sind, wurde ein Wochenendprofil berücksichtigt.

5.2.2 Industrieprofil

Für die Ermittlung eines Lastprofils für den Industriebedarf wurde eine Analyse der Fraunhofer Umsicht genutzt. Das Forschungsinstitut untersucht den deutschlandweiten Strombedarf, um den Bedarf von netzgekoppelten, elektrischen Energiespeichern zu bestimmen. Dabei ist die stündliche Nachfrage aller Bedarfssektoren von Interesse, weshalb das Institut zur Feststellung des Industrieverbrauchs eine Substitution der Standardlastprofile der Haushalte und des GHD vom Gesamtprofil des Europäischen Verbundsystems (UCTE) vorgenommen hat [FRA31]. In dieser Arbeit wird das Lastprofil der Übertragungsnetzbetreiber genutzt, um die genannten Standardlastprofil zu subtrahieren. Dadurch entsteht ein Industrieprofil mit dessen Ergänzung das Gesamtprofil dem tatsächlichen Verlauf des Jahresbedarfs der Übertragungsnetzbetreiber sehr nahe kommt. Das resultierende Lastprofil von 2011 ist im Anhang 4 ersichtlich (Abbildung 32).

5.2.3 Ladeprofil von Elektrofahrzeugen

Zur Erstellung eines Ladeprofils für Elektrofahrzeuge wurde das Fahrverhalten der Benutzer und die Ladeleistung der Ladepunkte berücksichtigt.

Bei der Abbildung des Fahrverhaltens wurde unterschieden zwischen Berufstätigen und Rentnern. Zu der Gruppe der Berufstätigen zählen sowohl Personen in einem Beschäftigungsverhältnis als Selbstständige oder Angestellte als auch Schüler und Auszubildende. Diese Gruppe hat einen geregelten

Tagesablauf mit festen Fahrzeiten. Zur Gruppe der Rentner zählen zusätzlich Hausfrauen und Arbeitslose. Diese Partei zeichnet sich durch spätere Fahrzeiten mit geringeren Strecken aus. Im Mittel wird angenommen, dass beide Gruppen etwa 33 km am Tag zurücklegen [JAN14].

Da der Absatz an Elektrofahrzeugen derzeit noch sehr gering ist und die Anschaffung noch relativ kostenintensiv ist, werden Elektrofahrzeuge derzeit nur von der Gruppe der Berufstätigen gehalten. Dies hat eine Studie des Fraunhofer ISI ermittelt, die das Kaufpotenzial für Elektrofahrzeuge untersucht. Dabei werden als Käufer gutsituierte Personen identifiziert. Im Zuge einer höheren Akzeptanz könnten zudem wohlhabende Rentner zum Bestandsziel von einer Millionen Elektrofahrzeugen bis zum Jahre 2020 beitragen [FRA12]. Es wird deshalb eine Nutzung von Elektrofahrzeugen zu 90 % von Berufstätigen und zu 10 % von der Gruppe der Rentner unterstellt, um freie Tage, Urlaub oder die Fahrten von Familienangehörigen oder Partnern zu simulieren. Bei einem höheren Absatz der Elektrofahrzeuge könnte der Anteil an Rentnern steigen, weshalb eine Verschiebung in der Nutzung von 90 % durch Berufstätige und 10 % durch Rentner auf 75 % durch Berufstätige und 25 % durch Rentner bis zum Jahre 2050 berücksichtigt wird.

Die Europäische Automobilherstellungsgesellschaft (ACEA) empfiehlt eine Ladung an öffentlichen Ladestationen mit im Schnitt 22 kW und einer Ladung an Haushaltsteckdosen, an denen einphasig mit 3,7 kW bzw. dreiphasig mit 11 kW geladen werden kann [ACE12]. Inzwischen existieren bereits über 2.200 öffentliche und halböffentliche Ladestationen und zwölf Schnellladestationen entlang von Autobahnen und in Städten [NAT12]. Im zweiten Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität wird eine Ladung im privaten Bereich zu 53 %, im gewerblichen Bereich zu 30 %, und im öffentlichen Bereich zu 16 % identifiziert. Der Schnellladung kommt nur 1 % zu [NAT11]. Da hier jedoch nur tägliche Fahrstrecken um die 33 km betrachtet werden, wird eine Schnellladung nicht berücksichtigt. Da, ausgenommen der Schnellladung, alle Ladearten zwischen 3,7 kW und 22 kW erfolgen können, wird hier angenommen, dass zu 40 % mit 3,7 kW und zu jeweils 30 % mit 11 kW und mit 22 kW geladen wird. Der langsamen Ladung mit 3,7 kW wird eine häufigere Nutzung unterstellt, da sie am schonendsten für den Akku und für den Benutzer am einfachsten zugänglich ist.

Burkard Rarbach, Pressesprecher von Mennekes, bestätigt diese Annahme, da die normale Haushaltssteckdose überall verfügbar ist und das Ladekabel zu dieser Ladung standardmäßig mit dem Fahrzeug mitgeliefert wird. Da das Laden mit 3,7 kW bei den von [JAN14] evaluierten Energiemengen bis zu fünf Stunden dauert, wurde ein separates Profil für diese Ladeleistung erarbeitet. Darin wird die jeweilige Energiemenge entsprechend über die nächsten Stunden verteilt. Beim Laden mit 11 kW kann das Laden der Energiemengen mehr als eine Stunde dauern, weshalb hierfür ebenfalls ein eigenes Profil angelegt wurde. In diesem Profil werden Energiemengen deren Ladedauer über eine Stunde beanspruchen würde, auf die nächste Stunde aufgeschlagen. Dadurch entstehen drei Ladeprofile, zum einen für das Laden mit 3,7 kW, zum anderen für das Laden mit 11 kW und ein Profil für eine Ladeleistung von 22 kW. Der Anteil der Profile am Gesamtprofil kann vom Nutzer im Prognosewerkzeug ausgewählt werden.

Das Programm von [JAN14] berücksichtigt eine genügende Kapazität für jede Fahrt und einen Mindeststand der Batterie von 10 % zwischen zwei Fahrstrecken. Dadurch wird gewährleistet, dass das Fahrzeug über genügend Energie verfügt, um die nächste Strecke bewältigen zu können. Für die

Dauer einer Ladung ist der Ladezustand eines Fahrzeugs relevant, da die Batterie schnell lädt, je leerer sie ist. Hat sie eine gewisse Sättigung erreicht, wird der Strom nur noch träge aufgenommen. Da in diesem Fall jedoch nur Strecken um die acht bis elf Kilometer betrachtet werden und die Ladung auch nur für etwa eine Strecke erfolgt, spielt der Ladezustand in diesem Fall keine Rolle.

Für die Entwicklung einer Lastzeitreihe soll eine vereinfachte Form des Demand-Side-Managements (DSM) berücksichtigt werden. Das DSM beschreibt die Verschiebung des Strombedarfs von Spitzenlastzeiten zu Schwachlastzeiten. Dabei soll die Stromnachfrage nach dem Angebot erneuerbarer Energien gesteuert werden. Das heißt, dass Elektrofahrzeuge nicht bei Bedarf, sondern zu Schwachlastzeiten, also bei hohem Angebot und nur einer geringen Nachfrage, geladen werden würden. In dieser Arbeit wird die Stromerzeugung von erneuerbaren Energien jedoch nicht berücksichtigt, sondern ein gesteuertes Laden zu Schwachlastzeiten, also über Nacht, integriert. Dem gesteuerten Laden muss der Fahrzeughalter zustimmen, weshalb diese Ladevariante nur für 25 % der Fahrzeuge bis zum Jahre 2050 angenommen wird [EHI14]. Das Laden soll dann über Nacht zwischen 01:00 Uhr und 05:00 Uhr morgens erfolgen. Zusätzlich ist es dem Nutzer möglich, die Ladezeiten stündlich zu variieren.

In der Bachelorarbeit von Sebastian Janocha [JAN14] wurden 39 Fahrzeuge untersucht. Im Mittel ergibt sich ein durchschnittlicher Verbrauch von etwa 15 kWh/100 km. Für die Darstellung des Verbrauchs über ein Jahr werden zehn repräsentative Fahrzeuge abgebildet, die zu gleichen Teilen in die Berechnung einfließen. Das erarbeitete Lastprofil ist im Anhang ersichtlich (Abbildung 33).

Bei Zusammensetzung der ermittelten Profile ergibt sich ein Gesamtprofil, das in Abbildung 18 dargestellt wird. Dieses Profil ermöglicht es den Einfluss einzelner Lastzeitreihen zu erkennen.

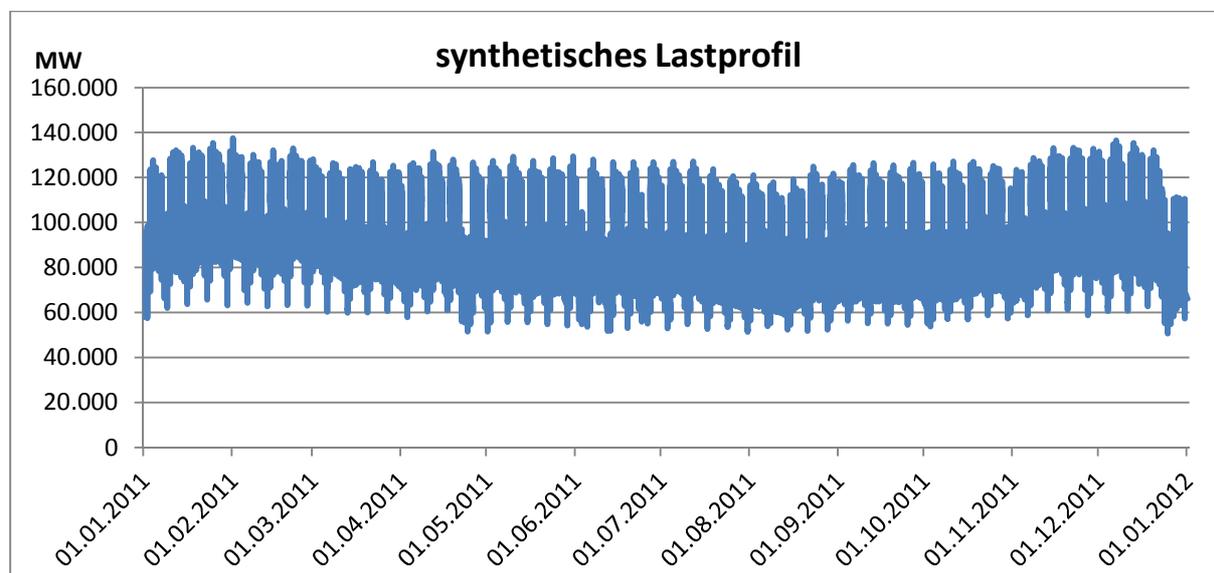


Abbildung 18: Synthetisches Lastprofil des Basisjahres 2011

6. Bedienung des Berechnungswerkzeuges

Es wird nachfolgend erörtert, wie sich das Prognosewerkzeug zusammensetzt und welche Möglichkeiten der Berechnung es bietet. Außerdem werden Hinweise zu Eingabeoptionen im synthetischen Lastprofil gegeben. Das Tool dient der Prognose des Strombedarfs bis zum Jahre 2050. Alle Berechnungen und Prognosen wurden für diesen Zeitraum ausgelegt.

6.1. Prognose des Strombedarfs im Tool

Grundsätzlich bestehen zwei Optionen zur Berechnung des zukünftigen Strombedarfs. Die erste besteht darin, die weitere Entwicklung des Stromverbrauchs anhand des bisherigen Verlaufs zu prognostizieren, die andere ergibt sich aus der Kopplung des Strombedarfs an die Einflussparameter Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungszahl. Es wird nun vorerst die allgemeine Struktur des Tools anhand der Berechnungsmethode nach dem Trendverlauf vorgestellt. Anschließend wird die Berechnung nach Einflussparametern erörtert und zu Letzt die Darstellung und Bedienung der Lastprofile diskutiert.

Die Wahl der Prognosemethode erfolgt über ein Auswahlfeld (1). Das Zieljahr, für das der Strombedarf berechnet werden soll kann mit Hilfe eines Dropdownfeldes bestimmt werden (2). Vorgegeben sind das Referenzjahr (3) sowie die Daten dieses Jahres (4). Das Referenzjahr stellt hier 2013 dar. Alle verwendeten historischen Werte, die bereits von 2013 veröffentlicht sind, werden hier hinterlegt. Archivierte Daten, die zeitlich weiter zurück liegen, wurden anhand der jeweils ermittelten Wachstumsrate auf das Referenzjahr hochgerechnet. Dadurch bekommt der Nutzer einen Überblick über den bisherigen Strombedarf eines Verbrauchers. Die Prognose erfolgt nun anhand von Formel 3.1 mit Hilfe der jährlichen Wachstumsrate. Für den Anwender besteht die Möglichkeit eigene Eingaben zu tätigen, mit der die Prognose durchgeführt wird. Durch die Eingabe einer nahezu nullprozentigen Wachstumsrate, kann ein stagnierender Strombedarf simuliert werden. Die Eingabe non Null-Werten kann vom Tool nicht verarbeitet werden, weshalb eine Annäherung an Null erfolgen muss. Dazu dienen alle orange hinterlegten Felder. Es kann entweder die jährliche Wachstumsrate in (5) eingegeben werden oder die absoluten Werte des Zieljahres in (6) beschrieben werden. Die gelb hinterlegten Felder bilden einen Sonderfall (7). In sie kann zum einen die erwartete Gesamtstrommenge des derzeitigen Bedarfs, d.h. durch Haushalte, Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Verkehr, in Form der Wachstumsrate oder des absoluten Verbrauchs eingetragen werden, und zum anderen der Anteil an Elektrofahrzeugen an der Gesamtfahrzeugzahl eingegeben werden. Korrespondierende Eingaben wie der Stromverbrauch einzelner Sektoren werden aus der Liste entfernt. Sie bilden damit Entweder/Oder-Felder. Zur besseren Übersicht werden die errechneten Werte im Ergebnisfeld „Ergebnis der Eingabe“ eingetragen (8). Möchte der Nutzer keine anderen Werte nutzen oder stehen keine besseren Daten zur Verfügung wird automatisch mit den hinterlegten Wachstumsraten gerechnet. Damit der Nutzer weiß worauf die Prognose tatsächlich basiert, und um Missverständnisse zu vermeiden, werden die verwendeten Werte im Feld „Verwendete Zahl“ eingetragen (9). Darunter besitzt jeder Bereich des Strombedarfs, wie der *Derzeitige Bedarf*, die *Mobilität* und die *Wärmepumpen*, ein optisch getrenntes Feld in dem der errechnete Strombedarf jeder Kategorie einzeln aufgezeigt wird (10). So wird nicht nur der Gesamtstrombedarf ersichtlich sondern auch die Zusammensetzung durch die Teilbereiche. Zu Letzt werden die Netzverluste des Strombedarfs ergänzt und die Summe aller Stromverbräuche im Feld „Strombedarf [TWh]“ eingetragen (11).

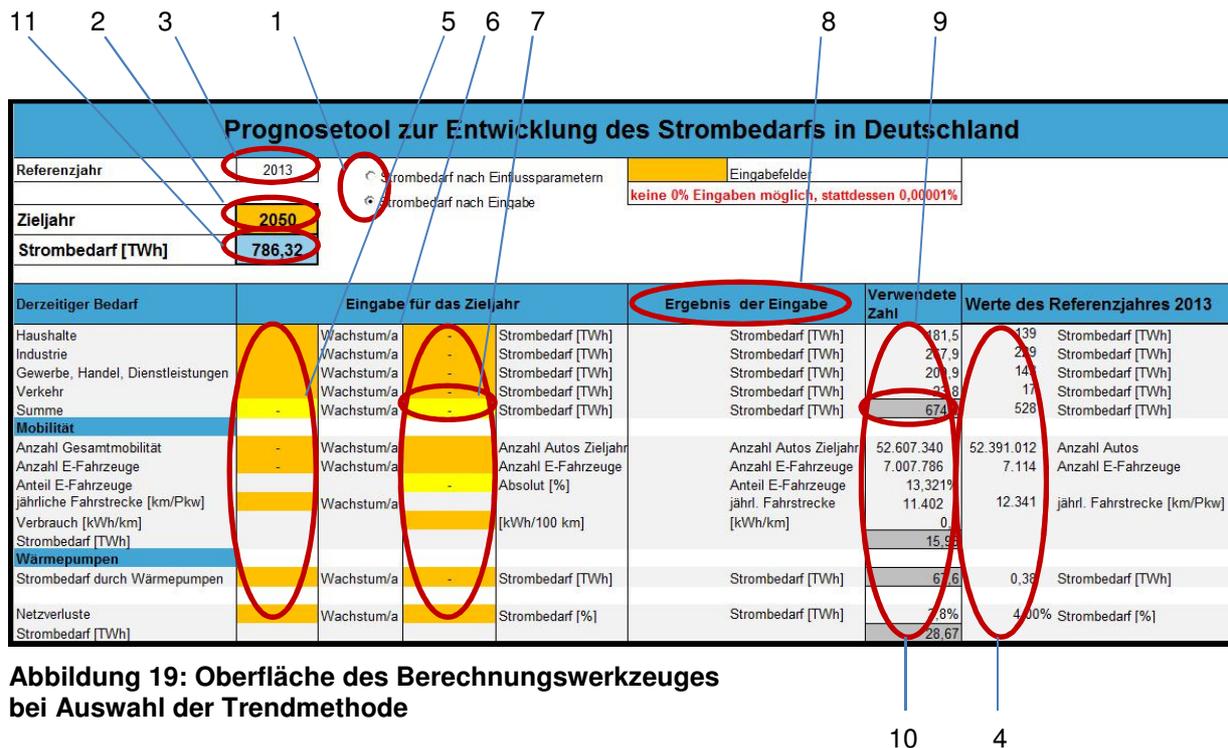


Abbildung 19: Oberfläche des Berechnungswerkzeuges bei Auswahl der Trendmethode

Wird die Auswahl der Berechnung durch Einflussparameter gewählt, verändert sich der obere Abschnitt *Derzeitiger Bedarf*. Alle übrigen Felder und Auswahlmöglichkeiten bleiben erhalten. Bei dieser Prognose erfolgt die Kalkulation anhand der Einflussparameter Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung. Außerdem kann die Stromproduktivität eingestellt werden (siehe Kapitel 4). Es wurde zuvor ermittelt, welchen Einfluss der jeweilige Parameter auf jeden Bedarfssektor hat und eine entsprechende Gewichtung vorgenommen. Nun wird das jährliche Wachstum des BIP und der Bevölkerungszahl entweder anhand der vorgegebenen errechneten Wachstumsrate oder mittels der Eingabe des Anwenders (1) bestimmt. Für die Entwicklung der Bevölkerung besteht zusätzlich die Möglichkeit eine absolute Zahl der Einwohner für das Zieljahr einzugeben (2). Auch bei dieser Vorhersage werden die Ergebnisse der individuellen Eingabe im Feld „Ergebnis der Eingabe“ (3) dargestellt und die Zahl, die für die Berechnung des Strombedarfs genutzt wird im Feld „Verwendete Zahl“ (4) aufgezeigt. Im Falle der Einflussfaktoren werden die Wachstumsraten für die weitere Kalkulation verwendet, so dass das Ergebnis aus (3) nur der Plausibilitätskontrolle über die eingegebenen Werte des Nutzers dient. Mit Hilfe der Wachstumsraten der Faktoren und den in 4.5 ermittelten Erwartungswerten der jeweiligen Sektoren, kann die Entwicklung aller Verbraucher des *Derzeitigen Bedarfs* anhand des Verlaufs von Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung prognostiziert werden. Dabei wird die Abhängigkeit eines Sektors von einem Parameter mit Hilfe der in 4.5 errechneten Gewichtung berücksichtigt. Die Effizienz gibt das Verhältnis von Strombedarf zu Bruttoinlandsprodukt an. Sie kann ebenfalls durch den Nutzer entweder je Bedarfssektor oder einmalig für den gesamten derzeitigen Bedarf (5) variiert werden. Der daraus resultierende Strombedarf wird in (3) dargestellt. Das heißt, dass der Stromverbrauch nicht allein durch das Bruttoinlandsprodukt, die Bevölkerungszahl oder die Effizienz errechnet werden kann, sondern immer nur das Verhältnis aller Parameter zueinander. Bei dieser Methode wird außerdem davon ausgegangen, dass sich der Strombedarf auch bei Stagnation von Bruttoinlandsprodukt und Einwohnerzahl weiterentwickelt und verändert.

Prognosetool zur Entwicklung des Strombedarfs in Deutschland						
Referenzjahr	2013	<input checked="" type="radio"/> Strombedarf nach Einflussparametern <input type="radio"/> Strombedarf nach Eingabe		Eingabefelder		
Zieljahr	2050	keine 0% Eingaben möglich, stattdessen 0,00001%				
Strombedarf [TWh]	743,01					
Derzeitiger Bedarf	Eingabe für das Zieljahr		Ergebnis der Eingabe		Verwendete Zahl	Werte des Referenzjahres 2013
Bruttoinlandsprodukt	Wachstum/a	Wachstum/a	Mrd. EUR	2,67%	2.752	Absolut [Mrd. EUR]
Bevölkerungsentwicklung	Wachstum/a	Bevölkerungszahl	Bevölkerungszahl	-0,34%	81.130.333	Bevölkerungszahl
Effizienz	Wachstum/a		Effizienz		1,88%	Effizienz
Haushalt	Wachstum/a		Strombedarf [TWh]	159,15	137	Strombedarf [TWh]
Industrie	Wachstum/a		Strombedarf [TWh]	277,97	228	Strombedarf [TWh]
GHD	Wachstum/a		Strombedarf [TWh]	175,98	142	Strombedarf [TWh]
Verkehr	Wachstum/a		Strombedarf [TWh]	19,37	17	Strombedarf [TWh]
Gesamtstrombedarf [TWh]				632,3	524	Strombedarf [TWh]
Mobilität						
Anzahl Gesamtmobilität	Wachstum/a	Anzahl Autos Zieljahr	Anzahl Autos Zieljahr	52.607.340	52.391.012	Anzahl Autos
Anzahl E-Fahrzeuge	Wachstum/a	Anzahl E-Fahrzeuge	Anzahl E-Fahrzeuge	7.007.786	7.114	Anzahl E-Fahrzeuge
Anteil E-Fahrzeuge		Absolut [%]	Anteil E-Fahrzeuge	13,321%		
jährliche Fahrstrecke [km/Pkw]	Wachstum/a	[km/100 km]	jährl. Fahrstrecke	11.402	12.341	jährl. Fahrstrecke [km/Pkw]
Verbrauch [kWh/km]			[kWh/km]	0,2		
Strombedarf [TWh]				15,98		
Wärmepumpen						
Strombedarf durch Wärmepumpen	Wachstum/a	Strombedarf [TWh]	Strombedarf [TWh]	67,6	0,38	Strombedarf [TWh]
Netzverluste	Wachstum/a	Strombedarf [%]	Strombedarf [TWh]	3,8%	4,00%	Strombedarf [%]
Strombedarf [TWh]				27,09		

Abbildung 20: Oberfläche des Tools bei Kalkulation nach Einflussparametern

6.2. Bedienung des Lastprofils im Tool

Nachdem der Strombedarf prognostiziert wurde, kann er in Form eines Lastprofils abgebildet werden. Dazu dient zum einen das Profil der Übertragungsnetzbetreiber (siehe Kapitel 6.1) oder das synthetische Profil, das in 6.2 erarbeitet wurde. Die Auswahl des Anwenders erfolgt über den Reiter. Der Strombedarf wird dann im Falle des ÜNB-Profiles als ein gesamter Bedarf in die Zeitreihe übertragen und im Falle des synthetischen Profils, das sich aus mehreren Einzelprofilen zusammensetzt, die jeweilige Strommenge eines Sektors auf das entsprechende Profil aufgetragen.

Um auch die errechneten Netzverluste im synthetischen Lastprofil zu berücksichtigen, wird der Anteil jedes Sektors am Gesamtbedarf berechnet und dieser Anteil auf die Netzverluste übertragen. Die jeweilige Strommenge kann dann dem entsprechenden Bedarfsfeld zugeschrieben werden. Im Fall dafür, dass im Tool der Gesamtbedarf von Haushalten, der Industrie, dem GHD und dem Verkehr eingetragen wurde, wird der Bedarf anhand des durchschnittlichen, statistischen Anteils auseinander gerechnet. Demnach nimmt der Bedarf durch Industrieanwendungen von 1990 bis 2011 durchschnittlich rund 43 % ein. Auf den Verbrauch in Haushalt und GHD entfallen im Mittel 27 % und der Bedarf durch öffentliche, schienengebundene Verkehrsmittel nimmt durchschnittlich etwa 3 % in Anspruch. Außerdem bestehen mehrere Möglichkeiten das Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen zu variieren. Dabei kann zum einen der Anteil an Fahrzeugen, die gesteuert geladen werden sollen und deren Ladezeiten verändert werden, und zum anderen die Nutzungshäufigkeit der Ladeleistung eingestellt werden. Als Basis wird im Prognosewerkzeug der Anteil der Fahrzeuge die gesteuert geladen werden, mittels des eingegebenen Zieljahres und einer Wachstumsrate von rund 24 % errechnet. Diese Steigung ergibt sich aus der Annahme, dass derzeit noch keine Fahrzeuge gesteuert geladen werden und in 2050 25 % der Fahrzeuge dazu freigegeben sein werden. Abbildung 21 zeigt die Basiseinstellung des Jahres 2050 mit einem Anteil von 25 % der Fahrzeuge, die zwischen 01:00 Uhr nachts und 05:00 Uhr morgens geladen werden. Außerdem wird als Grundeinstellung eine Ladung zu 40 % mit

3,7 kW, und zu jeweils 30 % mit 11 kW und 22 kW vorgegeben. Der Nutzer kann alle Eingaben verändern und über den Button „Ursprungszustand“ den Basiszustand wieder herstellen.

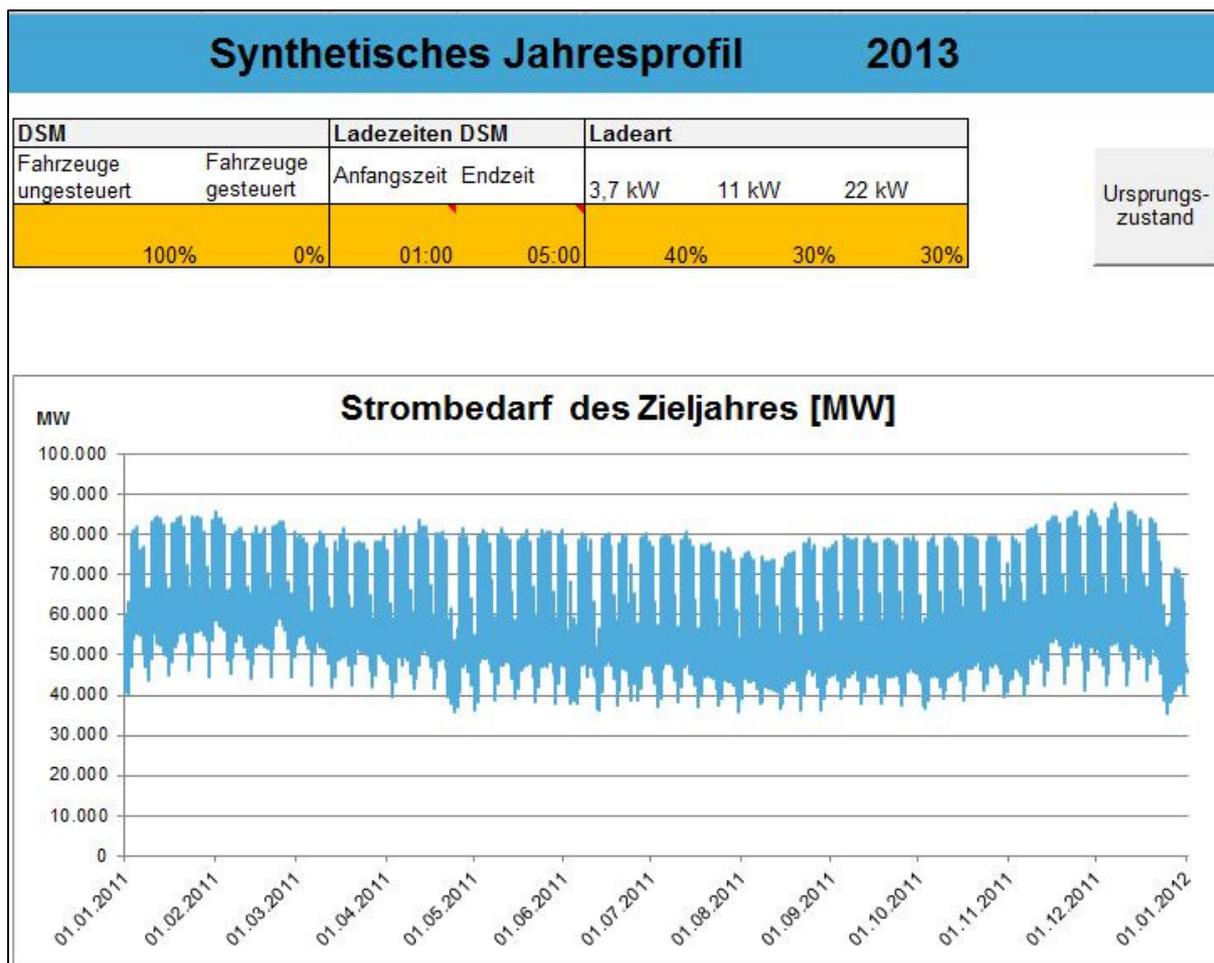


Abbildung 21: Oberfläche des synthetischen Lastprofils

7. Stärken und Schwächen

Nachfolgend soll diskutiert werden, welche Vor- und Nachteile das erarbeitete Prognosewerkzeug bietet und in wie weit der Strombedarf in kommenden Jahren abgeschätzt werden kann.

Der reale Stromverbrauch basiert auf einem Netzwerk aus Akteuren, politischen Strukturen und verhaltensorientierten Maßnahmen. Da es schwer fällt alle Einflüsse darzustellen und abzuschätzen wurde sich in dieser Arbeit für zwei Berechnungsmethoden entschieden. Zum einen wird die Entwicklung des Strombedarfs nach dem bisherigen Trend und zum anderen anhand der Einflussparameter Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung prognostiziert. Das Trendszenario bietet den Vorteil dass das Wachstum über eine Zeitspanne von rund zwanzig Jahren ermittelt wurde und damit eine fundierte Grundlage zur Vorhersage über den zukünftigen Verlauf bietet. Es bleibt unklar, ob sich der Strombedarf tatsächlich weiter wie bisher entwickeln wird, jedoch besteht für den Nutzer die Möglichkeit den Verlauf durch Veränderung der jährlichen Wachstumsrate zu variieren. Da die einzelnen Sektoren des derzeitigen Strombedarfs (Haushalte, Industrie, GHD, Verkehr) aktuell zwischen jährlich 0,4 % und 1 % wachsen, bewegt sich die Variationsmöglichkeit in einem relativ kleinen Rahmen. Schon bei Eingaben über 1 % reagiert der Strombedarf des jeweiligen Sektors stark auf die Veränderung. Es wäre

möglich eine Deckelung des Verbrauchs für jedes Bedarfsfeld einzuführen, doch soll die Dynamik des Werkzeuges nicht eingeschränkt werden.

Methode 2 hat die Stärke, dass Änderungen in Demografie und Wirtschaft in der Prognose erfasst werden. Durch die erarbeitete Berechnungsweise (siehe 4.2) nehmen sinkende Bevölkerungszahlen und ein steigendes Bruttoinlandsprodukt direkten Einfluss auf die Entwicklung des Stromverbrauchs. Bei dieser Methode wird ein konstantes Verhältnis und damit eine steigende Divergenz zwischen Strombedarf und Einflussparametern unterstellt. Als Basis für die Berechnung werden eine negative Bevölkerungsentwicklung und ein expandierendes Bruttoinlandsprodukt angenommen, deren jährliche Wachstumsraten jedoch für den Nutzer variabel sind. Im Falle der Entwicklung des Strombedarfs nach Bruttoinlandsprodukt besteht zusätzlich die Option das Verhältnis von Stromverbrauch zu BIP zu verändern und damit die Stromeffizienz zu beeinflussen. Bei dieser Methode wird außerdem davon ausgegangen, dass sich der Strombedarf auch bei Stagnation des Bruttoinlandsproduktes und der Einwohnerzahl weiterentwickelt und verändert.

Beide Methoden ergeben immer einen gradlinigen Verlauf, da hier Zeitreihen berechnet werden, in denen keine Höhen und Tiefen des tatsächlichen Verlaufs abgebildet werden können. In der Berechnung wird mit Anfangswert, Wachstumsrate und Jahresdifferenz zwischen Anfang- und Zieljahr gerechnet, sodass alle Sprünge in der Zeitspanne dazwischen geglättet, bzw. nicht berücksichtigt werden. Da der zeitliche Verlauf in dieser Arbeit jedoch keine Beachtung findet, sondern der errechnete Strombedarf des Zieljahres von Relevanz ist, hat diese Vereinheitlichung des Wachstums hier keine Auswirkungen. Außerdem muss bedacht werden, dass der errechnete Strombedarf sowie verwendete Lastprofile immer vom tatsächlichen Verbrauch abweichen werden, weil keine hundert prozentige Vorhersage möglich ist. Um die Prognose der Realität weiter anzunähern, könnten der Einflüsse des Klimawandels untersucht werden, der das Heizverhalten beeinflusst und damit einen entscheidenden Faktor zur Bestimmung des Strombedarfs durch Wärmepumpen liefern würde. Zusätzlich könnten politische und wirtschaftliche Entwicklungen genauer betrachtet werden. Änderungen in der Politik können zu erhöhten Subventionen führen, die den Markteintritt neuer Technologien unterstützen, oder eine Expansion verhindern, wenn erwartete Konjunkturen ausbleiben oder Innovationen gedeckelt werden. Außerdem könnten steigende Treibstoffkosten einen zusätzlichen Anreiz zum Kauf eines Elektrofahrzeugs bieten, oder erhöhte CO₂-Kosten zu zusätzlichen Einsparmaßnahmen in der Industrie führen. Über die Entwicklung des Strombedarfs selbst entscheidet letztendlich jedoch der Mensch, dessen Beweggründe und Intensionen schwer abzubilden sind. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass durch die Integration von Bevölkerungszahl und Bruttoinlandsprodukt im Prognosewerkzeug die wesentlichen Faktoren zur Entwicklung des Strombedarfs abgebildet wurden.

8. Zukunftsaussichten

Für die Zukunft kann von einem erhöhten Management der Stromversorgung ausgegangen werden, was die ermittelten Lastzeitreihen stark verändern würde. Das Smart Grid könnte weite Teile des Landes intelligent vernetzen. Außerdem kann für die Zukunft ein erhöhtes Maß an Demand-Side-Management angenommen werden. Dieses drückt die Lastverschiebung von Spitzenlastzeiten zu Schwachlastzeiten aus. Dabei soll vorrangig das volatile Angebot durch erneuerbare Energien abgefangen werden, bei dem der Bedarf der Erzeugung folgt. Zusätzlich könnte dadurch jedoch auch das

gesamte Profil geglättet werden, sodass größere Kraftwerke mit längeren An- und Abfahrtszeiten nur geringfügig geregelt werden müssten. Wenn viel Energie umgesetzt wird, soll diese gespeichert werden und zu Zeiten einer geringen Erzeugung zum Einsatz kommen. Elektrofahrzeuge könnten dann auch als Speicher für das Demand-Side-Management dienen. Dabei wird das Fahrzeug bei einer hohen Erzeugung durch erneuerbare Energien mit überschüssigem Strom beladen und zu Spitzenlastzeiten entladen. Man spricht dabei von Vehicle to Grid. Dadurch könnte das Elektrofahrzeug nicht nur negative, sondern auch positive Regelleistung zur Verfügung stellen und zu einer gleichmäßigeren Lastverteilung beitragen. Bei einer negativen Regelleistung ist die nicht Aufnahme von Strom zu Spitzenlastzeiten gemeint. In diesem Fall würde ein Fahrzeug bspw. zu Spitzenlastzeiten nicht Laden, sondern von der über Nacht erfolgten Ladung profitieren. Mit positiver Regelleistung ist die Abgabe von Strom aus Speichern zu Spitzenlastzeiten gemeint. Außerdem besteht die Möglichkeit des DSM auch im Bereich der Kühlung. Dabei kann überschüssiger Strom dazu genutzt werden Kühltemperaturen weiter zu reduzieren und dadurch einzuspeichern. Zu Spitzenlastzeiten kann die Versorgung dann kurzzeitig unterbrochen, und dabei die Kühltemperatur wieder auf das gewohnte Niveau gebracht werden. Dafür müsste eine Prognose über die Einspeisung durch erneuerbare Energien integriert werden, um damit Erzeugerspitzen abzuschätzen und Speichermaßnahmen zu berücksichtigen. Außerdem könnte in der Zukunft auch das induktive Laden von Elektrofahrzeugen eine Rolle spielen, sowie Schnellladestationen und die Ladung mit Gleichstrom mit bis zu 50 kW. Auch nicht berücksichtigt in dieser Arbeit wurde die Ladung an öffentlichen Stationen mit 44 kW, die ab dem Jahre 2014 Anwendung finden sollen [NAT10].

Auf Grund der zunehmenden Vernetzung Deutschlands, wäre auch eine Prognose über die Entwicklung des Strombedarfs der Nachbarländer sinnvoll. Um das Berechnungswerkzeug auf andere Länder übertragen zu können, müssten die historischen Werte jedes Landes gesichtet werden und die jeweilige Wachstumsrate des Stromverbrauchs errechnet werden. Außerdem müssten die Anzahl an Elektrofahrzeugen und Wärmepumpen und der Verkauf der letzten Jahre eruiert werden, um damit das jährliche Wachstum zu bestimmen. Dadurch könnten alle jährlichen Wachstumsraten und alle historischen Daten eines beliebigen Referenzjahres im Tool hinterlegt werden. Die Festlegung auf ein fixes Referenzjahr, zu dem der Stromverbrauch und die Wachstumsrate gehören, ist wichtig, um mit Formel 3.1, mit der errechneten Wachstumsrate, dem Anfangs- und Endjahr und dem Anfangswert, auf dem die Rechnung basiert, eine Prognose zu erstellen. Über ein Auswahlfeld könnte dann ein Land ausgewählt werden, und die zugehörigen Wachstumsraten und fixen Daten in das Prognosewerkzeug übertragen werden. Um die Abhängigkeit des Strombedarfs von Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung auch für andere Länder zu berücksichtigen, müsste nach Methode 2 (siehe 4.1/4.2) vorgegangen werden. Grundlage bieten jedoch die historischen Daten von BIP und Bevölkerungszahl. Der Referenzwert sowie die errechnete jährliche Wachstumsrate können dann ebenfalls im Tool übernommen werden. Mit den archivierten Daten der Einflussparameter kann der spezifische Strombedarf für jedes Jahr errechnet werden und daraus der Mittelwert gebildet werden. Dieser gibt ein Verhältnis zwischen Faktor und Strombedarf an, mit dessen Hilfe der Stromverbrauch anhand der Einflussparameter prognostiziert werden kann. Steht das Verhältnis fest, muss die Formel im Tool hinterlegt werden.

9. Fazit

Ziel der Arbeit war es den Strombedarf bis zum Jahre 2050 zu prognostizieren und Zeitreihen zu entwickeln, die diese Energiemenge über ein Jahr abbilden. Außerdem sollte ein Berechnungswerkzeug entworfen werden, in dem der Strombedarf vorhergesagt wird und die erarbeiteten Lastprofile eingepflegt werden. Das Tool sollte dynamisch sein, sodass Veränderungen durch den Anwender möglich sind. Dafür wurde der Stromverbrauch von Haushalten, Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistung und öffentlichen, schienengebundenen Verkehrsmitteln untersucht. Dieser Teilbereich des Strombedarfs wurde in dieser Arbeit als *Derzeitiger Bedarf* beschrieben. Zusätzlich wurde der Stromverbrauch durch elektrifizierte Heizungen und Fahrzeuge analysiert. Dieser Teilbereich wurde mit dem Überbegriff *Neue Technologien* besetzt. Es wird davon ausgegangen, dass der Strombedarf im Heizungs- und Transportsektor auf Grund des Substitutionspotentials noch steigen wird. Daher wurden die Ausbaumöglichkeiten von Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen genauer untersucht.

Zur Berechnung der weiteren Strombedarfsentwicklung wurden hauptsächlich archivierte Daten und teilweise Prognosen verwendet. Da die Aktualität der Datenlage recht unterschiedlich ausfiel, wurden alle Werte auf das Basisjahr 2013 hochgerechnet. Zur Vorhersage des Strombedarfs von Haushalten, der Industrie, dem Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und öffentlichen Verkehrsmitteln wurden zwei Methoden verwendet. Zum einen wurde der Bedarf anhand des bisherigen Trendverlaufs prognostiziert und zum anderen mit Hilfe von Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung vorhergesagt. Die Daten des derzeitigen Bedarfs wurden bisher nur bis zum Jahre 2011 veröffentlicht, weshalb der Stromverbrauch für diesen Teilbereich nach der jeweiligen Methode auf das Referenzjahr 2013 hochgerechnet wurde.

Alle Teilbereiche des Strombedarfs sind im Prognosewerkzeug aufgezeigt und können vom Nutzer durch Variation der Wachstumsraten verändert werden. Als Alternative kann der Anwender auch einen absoluten Wert für das Zieljahr eingeben und so den Strombedarf variieren.

Aus der Vorhersage des Strombedarfs nach den historischen Messwerten der letzten zwanzig Jahre, ergibt sich ein langfristiger Trend, der mittels einer jährlichen Wachstumsrate erfasst wurde. Mit Hilfe dieser Wachstumsrate kann die Entwicklung des Stromverbrauchs bis zum Jahre 2050 prognostiziert werden. Die Trendverlauf-Methode ergibt für das Jahr 2050 einen Strombedarf des Teilbereichs *Derzeitiger Bedarf* von in Summe 637 TWh. Dies entspricht bei einem Strombedarf in 2013 von rund 528 TWh, einer jährlichen Wachstumsrate von etwa 0,7 %.

Bei der Prognose des Strombedarfs in Abhängigkeit von Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung, wurde die Parallelität zwischen der Entwicklung des Strombedarfs und der Einflussparameter untersucht. Die Gewichtung des Einflusses von Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungszahl auf einen Sektor des derzeitigen Bedarfs, wurde anhand der Höhe der Abweichung eines parallelen Verlaufs vorgenommen. Dabei wiesen alle Sektoren eine höhere Affinität zum Einflussfaktor Bevölkerungszahl auf mit Ausnahme des Industriesektors. Dieser zeigte die gleiche Korrelation zu Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung. Außerdem bildete sich eine deutliche Divergenz zwischen Sektoren und Einflussparametern. Bei Betrachtung des Strombedarfs und der Bevölkerungszahl, zeigte sich ein schnelleres Wachstum aller Strombedarfssektoren. Die Analyse der Korrelation zwischen Bruttoinlandsprodukt und Strombedarf dagegen, lies ein wesentlich schnelleres wirtschaftliches Wachstum erkennen. Aus der Prognose des Strombedarfs nach Bruttoinlandsprodukt und Bevölke-

rungszahl ergab sich ein Stromverbrauch für das Jahr 2050 von insgesamt 632 TWh. Basierend auf einem Strombedarf in 2013 von 524 TWh, entspricht dies einer jährlichen Wachstumsrate von etwa 0,5 %. Die Effizienz wird als das Verhältnis zwischen Bruttoinlandsprodukt und Strombedarf angegeben und steigt um jährlich fast 2 %. Dies ergibt sich aus der Annahme, dass bei einem stark wachsenden Bruttoinlandsprodukt und einem geringeren Wachstum des Strombedarfs mehr Nutzen aus dem eingesetzten Strom gezogen werden kann.

Beim Vergleich beider Prognosen des Strombedarfs von Haushalten, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, dem Verkehr und der Industrie, zeigt sich eine geringere Steigung des Stromverbrauchs bei der Vorhersage nach Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung. Dies ist auf den rückläufigen Trend der Bevölkerungszahlen zurückzuführen. Diese Vorhersage ist besonders geeignet, um wirtschaftliche und demografische Entwicklungen zu berücksichtigen. Außerdem wird bei dieser Prognose davon ausgegangen, dass sich der Strombedarf auch bei Stagnation beider Einflussparameter weiterentwickelt und verändert. Bei der Vorhersage des Stromverbrauchs nach dem Trendverlauf dagegen kann ein stagnierender Strombedarf durch die Eingabe einer nullprozentigen Steigung simuliert werden. Diese Methode der Strombedarfsvorhersage erfasst einen langfristigen Trend und eignet sich zur Ermittlung des Strombedarfs ungeachtet kommender Umstrukturierungen.

Die Prognose des Strombedarfs neuer Technologien beschäftigt sich mit dem Ausbaupotenzial von Wärmepumpen und von Elektrofahrzeugen. Für die Vorhersage des Stromverbrauchs durch Wärmepumpen wurde eine Studie herangezogen, die einen Strombedarf dieser Technologie im Jahre 2050 von rund 68 TWh prognostiziert. Da zu diesem Thema kaum historische Daten verfügbar sind wurde nur diese Methode verwendet. Bei einem Strombedarf in 2013 von etwa 0,4 TWh lässt sich daraus eine Wachstumsrate von jährlich rund 15 % errechnen.

Für die Ermittlung des Strombedarfs durch Elektrofahrzeuge bis 2050 wurden zum einen die Anzahl der Fahrzeuge anhand des Verkaufs in den letzten Jahren und zum anderen das Wachstum mit Hilfe der Korrelation von Verkaufszahlen und der Entwicklung der Einflussparameter Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungszahl untersucht. Auf Grund des exponentiellen Anstiegs an in Deutschland gemeldeten Elektrofahrzeugen, zeigte sich jedoch kein Zusammenhang weder zur Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes, noch zur Veränderung der Bevölkerungszahlen. Bei der Analyse der archivierten Absatzzahlen von 2006 bis 2013, konnte eine Wachstumsrate von jährlich fast 21 % festgestellt werden. Daraus ergibt sich ein Anstieg an Elektrofahrzeugen bis zum Jahre 2050 auf etwa 7 Millionen Fahrzeuge. Zusätzlich zur Anzahl der Elektrofahrzeuge, soll der Anwender einen Anteil der Gesamtfahrzeugzahl bestimmen können. Dafür wurde auch die Entwicklung der Gesamtfahrzeuge untersucht und einer Studie nach eine jährliche Wachstumsrate von etwa 0,2 % bis zum Jahre 2020 eruiert. Anschließend soll die Anzahl an Fahrzeugen stagnieren. Der Strombedarf durch Elektrofahrzeuge kann dann anhand der Anzahl der Fahrzeuge, einem durchschnittlichen Verbrauch von 20 kWh/100 km und der ermittelten jährlichen Fahrstrecke vorhergesagt werden. Anhand der Trendmethode ergab sich für das Referenzjahr 2013 ein Stromverbrauch von 0,02 TWh. Für das Zieljahr 2050 wurde ein Anstieg auf fast 16 TWh prognostiziert.

Um zu ermitteln, welche Strommenge im Netz übertragen werden muss, wurde ein Anteil von 4 % als Netzverluste auf den Gesamtstrombedarf aufgerechnet.

Zur Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Strombedarfs über ein Jahr wurden zwei Profile verwendet. Zum einen die gemessene Zeitreihe der Übertragungsnetzbetreiber und zum anderen die Zusammensetzung mehrerer synthetischer Profile. Die Lastzeitreihe der Übertragungsnetzbetreiber beschreibt den tatsächlichen Verlauf des Strombedarfs. Dieses Profil ist besonders für die Darstellung des Stromverbrauchs der nächsten Jahre geeignet, da sich der Bedarf in den kommenden Jahren in Bezug auf den zeitlichen Verlauf kaum verändern wird und die gemessene Zeitreihe deshalb eine solide Basis bietet.

Das synthetische Profil ist zusammengesetzt aus Standardlastprofilen des VDEW und, unter zu Hilfe-nahme verschiedener Vorlagen, erarbeiteten Profilen. Diese Lastzeitreihe ist vor allem bei der Abbildung des Stromverbrauchs in weiterer Zukunft anwendbar. Es kann angenommen werden, dass sich die Anzahl an Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen bis dahin stark erhöht hat und deren Strombedarf die Lastzeitreihe entscheidend beeinflusst. In diesem Profil wird der Einfluss verschiedener Bedarfssektoren besonders ersichtlich. Außerdem kann der Nutzer in dieser Zeitreihe einige Variationen des Ladeverhaltens von Elektrofahrzeugen vornehmen. Es kann bspw. der Anteil an Fahrzeugen, die gesteuert geladen werden sollen und deren Ladezeiten eingestellt werden. Zusätzlich besteht die Option den Anteil der genutzten Ladeleistungen zu variieren. Als Basiseinstellung wird eine Ladeleistung zu 40 % mit 3,7 kW und zu jeweils 30 % mit 11 kW und 22 kW vorausgesetzt. Für das gesteuerte Laden wird angenommen, dass im Jahre 2013 noch keine Fahrzeuge gesteuert geladen werden, sich dieser Anteil jedoch bis zum Jahre 2050 dahin gehend verschiebt, dass dann 25 % der Elektrofahrzeuge gesteuert und 75 % der E-Fahrzeuge ungesteuert geladen werden. Je nach Eingabe des Zieljahres, wird der Anteil der Fahrzeuge die gesteuert bzw. ungesteuert geladen werden als Basiseinstellung anhand der Wachstumsrate berechnet. Die Ladezeiten sind im Grundzustand zwischen 01:00 Uhr nachts und 05:00 Uhr morgens eingestellt, da hier ganzjährig die geringste Last herrscht.

- [BUN12] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: „Erster Monitoring Bericht – Energie der Zukunft“. Berlin 2012.
Online einsehbar unter:
<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/erster-monitoring-bericht-energie-der-zukunft,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
(9.5.2014)
- [BUN12a] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: „Zweiter Monitoring-Bericht „Energie der Zukunft““. Berlin 2012.
Online einsehbar unter:
<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/zweiter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
(9.7.2014)
- [BUN13] Bundesverband Wärmepumpen e.V.: „BMP-Branchenstudie 2013 – Szenarien und politische Handlungsempfehlungen“. Berlin 2013.
Online einsehbar unter:
http://www.waermepumpe.de/uploads/tx_bwppublication/2013_BWP-Branchenstudie_Bildschirmversion_01.pdf (27.4.2014)
- [BUN14a] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: „Zweiter Monitoring Bericht – Energie der Zukunft“. Berlin 2014.
Online einsehbar unter:
<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/zweiter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
(9.5.2014)
- [DES14] <https://www.destatis.de/DE/UeberUns/UeberUns.html> (6.7.2014)
- [DES14a] https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Tabellen/Zensus_Geschlecht_Staatsangehoerigkeit.html;jsessionid=393EC9A000262E77C13E7150C7AEFF21.cae4 (23.4.2014)
- [DES14b] <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/Bevoelkerungsvorausberechnung.html> (23.4.2014)
- [DES14c] <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/HaushalteFamilien/Tabellen/Haushaltsgroesse.html> (30.4.2014)
- [DES14d] <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Haushaltsvorausberechnung/Tabelle/VorausberechnungHaushalte.html> (30.4.2014)
- [EHI14] http://www.e-highway2050.eu/fileadmin/documents/Workshop2/3-1_e-Highway2050_WS2_Demand_data.pdf (19.6.2014)
- [ENE14] <http://www.energieeffizient-sanieren.org/index.php?topic=1599.msg2192#msg2192>
(27.4.2014)

- [ENE14a] <http://www.energie-lexikon.info/lastprofil.html> (13.5.2014)
- [ENE14b] <http://www.energiegemeinschaft-halle.de/Vortrag/2009031630-Schulung/20090330Grasso.pdf> (10.7.2014)
- [EUR07] Eurostat: „Mobilität im Personenverkehr in Europa“. Luxembourg 2007.
- [ELW14] http://elweb.info/dokuwiki/doku.php?id=verbrauchswerte_von_elektrofahrzeugen (26.4.2014)
- [FRA12] Fraunhofer ISI: „Kaufpotenzial für Elektrofahrzeuge bei sogenannten „Early Adoptern““. Karlsruhe 2012.
Online einsehbar unter: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/Schlussbericht_Early_Adopter.pdf (26.6.2014)
- [FRA13] Fraunhofer Umsicht, Fraunhofer IOSB/AST: „Modellbasierte, regional aufgelöste Analyse des Bedarfs an netzgekoppelten elektrischen Energiespeichern zum Ausgleich fluktuierender Energien“. Oberhausen/Ilmenau 2013.
- [GEM12] GGEMO, Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung: „Regierungsprogramm Elektromobilität – Übersicht zu umgesetzten oder initiierten Maßnahmen“. Berlin 2012.
Online einsehbar unter: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmuimport/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_emob_3_regierungsprogramm_bf.pdf (26.4.2014)
- [JAN14] Janocha, Sebastian: „Modellierung von Fahrprofilen in Matlab/Simulink für elektrische PKW und Plugin-Hybride“. Köln 2014.
- [KBA14] http://www.kba.de/cln_031/nn_191172/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/b_fzkl_zeitreihe.html (23.4.2014)
- [KBA14b] http://www.kba.de/cln_031/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/b_umwelt_z_teil_2.html (26.4.2014)
- [KOS66] Kosiol, Erich: „Finanzmathematik“. Wiesbaden 1966.
- [KRA01] Kraftfahrtbundesamt: „50 Jahre Kraftfahrt-Bundesamt 1951 bis 2001“. Flensburg 2001.
Online einsehbar unter: http://www.kba.de/DE/Service/Veroeffentlichungen/50_jahre_KBA_festschrift_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (27.6.2014)
- [LEC09] Lechwerke AG: „Was ist ein Lastprofil?“. Augsburg 2009.
Online einsehbar unter: http://www.lew.de/CLP/downloads/Produktinfos/ERS_G_S_Lastprofil.pdf (13.5.2014)
- [MEN13] Mennekes: „Medieninformation - Elektromobilität: Die kleine Ladung zwischendurch - Sicher laden mit dem richtigen Ladekabel für Mode 2“. Kirchhunden 2013.
- [MEY02] Meyer, Dietrich: „Statistische Testmethoden“. Velber 2002.
- [NAT10] Nationale Plattform Elektromobilität: „Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität“. Berlin 2010.
Online einsehbar unter: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmuimport/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_emob_bf.pdf (30.6.2014)

- [NAT11] Nationale Plattform Elektromobilität: „Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität“. Berlin 2011.
Online einsehbar unter: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_emob_2.pdf (3.7.2014)
- [NAT12] Nationale Plattform Elektromobilität: „Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (Dritter Bericht)“. Berlin 2012.
Online einsehbar unter: <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/elektromobilitaet-bericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> (3.7.2014)
- [OCH14] <http://www.ochsner.com/de/grossanlagen/produkte-grossanlagen1/> (10.7.2014)
- [OPP03] Oppitz, Volker und Nollau, Volker: „Taschenbuch Wirtschaftlichkeitsrechnung“. München 2003.
- [SED14] <http://sedl.at/Elektroauto/Verbrauch> (26.4.2014)
- [SHE09] Shell: „Shell PKW-Szenarien bis 2030 – Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität“. Hamburg 2009.
Online einsehbar unter: <http://www.shell.de/aboutshell/media-centre/annual-reports-and-publications/shell-pkwszenarien.html> (23.4.2014)
- [STA14] http://stadtwerke-ffb.de/fileadmin/gfx/unternehmen/Netz/Lastprofil_Haushalt_Heizung.pdf (23.6.2014)
- [UMW12] Umweltbundesamt: „Energieeffizienz für den Klimaschutz“. Dessau-Roßlau 2012.
Online einsehbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4343.pdf> (9.5.2014)
- [UMW12a] Umweltbundesamt: „EU verbannt Klimasünder“. Dessau-Roßlau 2012.
Online einsehbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/press/pd12-022_eu_verbannt_klimasuender.pdf (7.7.2014)
- [UNE14] <http://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/strommix-in-deutschland-2013> (6.7.2014)
- [UNI14] https://www.uni-leipzig.de/stksachs/tl_files/media/pdf/lehrbuecher/informatik/Regressionsanalyse.pdf (13.5.2014)
- [VDE99] VDEW (Verband der Elektrizitätswirtschaft): „Repräsentative VDEW-Lastprofile“. Frankfurt 1999.
- [VDE00] VDEW (Verband der Elektrizitätswirtschaft): „Anwendung der repräsentativen VDEW-Lastprofile, step – by - step“. Frankfurt 2000.
- [VER12] Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen: „Einflussfaktoren auf die Stromnachfrage“. Aarau 2012.
Online einsehbar unter: http://www.strom.ch/uploads/media/VSE_BWD_15_Einflussfaktoren-Nachfrage_03-2013.pdf (9.5.2014)
- [VSG14] <http://www.vsg-netz.de/vsgnetz/Stromnetz/Lastprofilverfahren.php> (13.5.2014)

11. Anhang 1: Spezifischer Strombedarf nach Bruttoinlandsprodukt

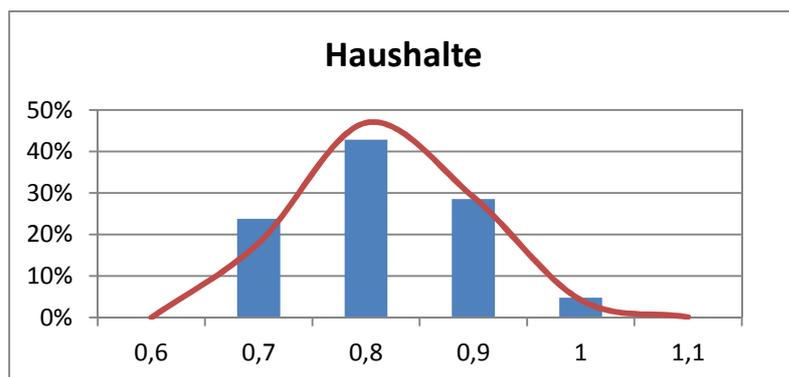


Abbildung 22: Häufigkeitsverteilung des spezifischen Strombedarfs des Haushaltsbedarfs nach Index 1991=100 des Bruttoinlandsproduktes und des Strombedarfs

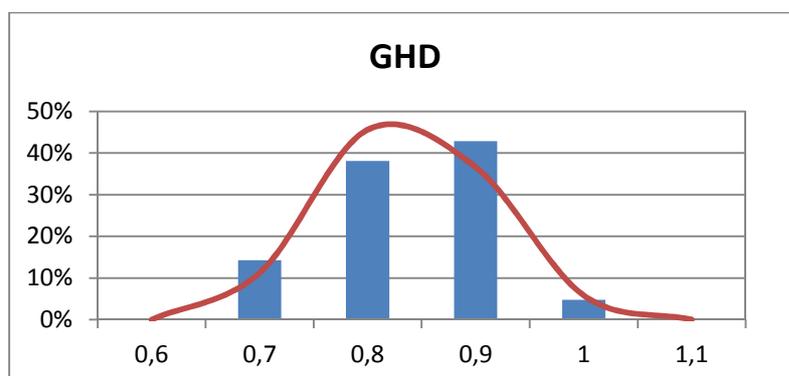


Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung des spezifischen Strombedarfs des Gewerbe-, Handels-, Dienstleistungsbedarfs nach Index 1991=100 des Bruttoinlandsproduktes und des Strombedarfs

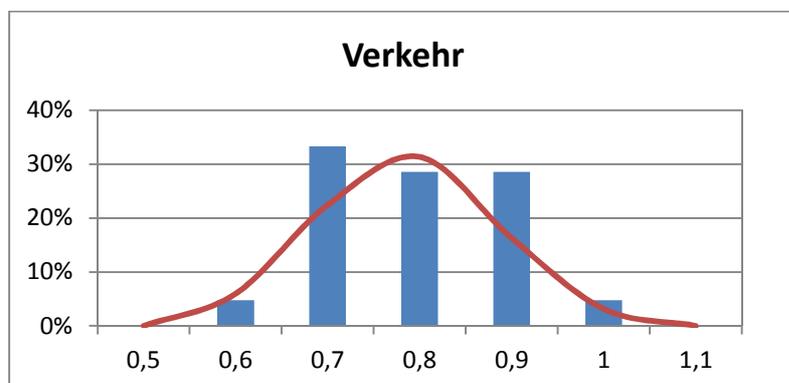


Abbildung 24: Häufigkeitsverteilung des spezifischen Strombedarfs des Verkehrsbedarfs nach Index 1991=100 des Bruttoinlandsproduktes und des Strombedarfs

Tabelle 10: Entwicklung des spezifischen Stromverbrauchs nach dem Bruttoinlandsprodukt von 1991 bis 2011

Jahr	Spezifischer Stromverbrauch [TWh/Mrd. €]			
	Haushalte	Industrie	GHD	Verkehr
1991	0,08	0,13	0,08	0,010
1992	0,07	0,11	0,07	0,009
1993	0,07	0,11	0,07	0,009
1994	0,07	0,10	0,07	0,009
1995	0,07	0,10	0,07	0,009
1996	0,07	0,10	0,07	0,009
1997	0,07	0,10	0,07	0,009
1998	0,07	0,10	0,07	0,008
1999	0,07	0,10	0,06	0,008
2000	0,06	0,10	0,07	0,008
2001	0,06	0,10	0,06	0,008
2002	0,06	0,10	0,07	0,008
2003	0,06	0,10	0,06	0,007
2004	0,06	0,10	0,06	0,007
2005	0,06	0,10	0,06	0,007
2006	0,06	0,10	0,06	0,007
2007	0,06	0,10	0,05	0,007
2008	0,06	0,09	0,05	0,007
2009	0,06	0,08	0,06	0,007
2010	0,06	0,09	0,06	0,007
2011	0,05	0,09	0,05	0,006

12. Anhang 2: Spezifischer Strombedarf nach Bevölkerungszahl

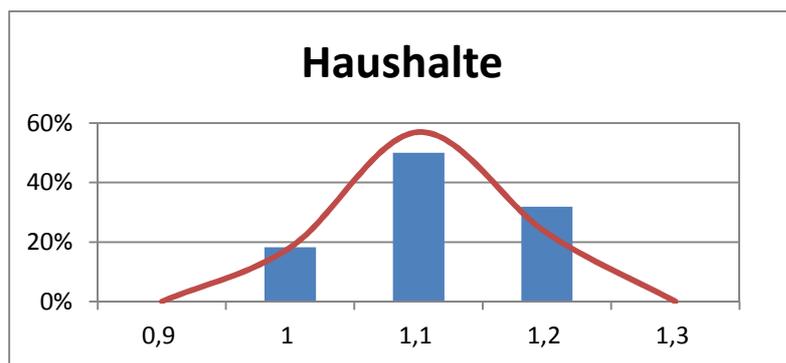


Abbildung 25: Häufigkeitsverteilung des spezifischen Strombedarfs des Haushaltsbedarfs nach Index 1990=100 der Bevölkerungszahl und des Strombedarfs

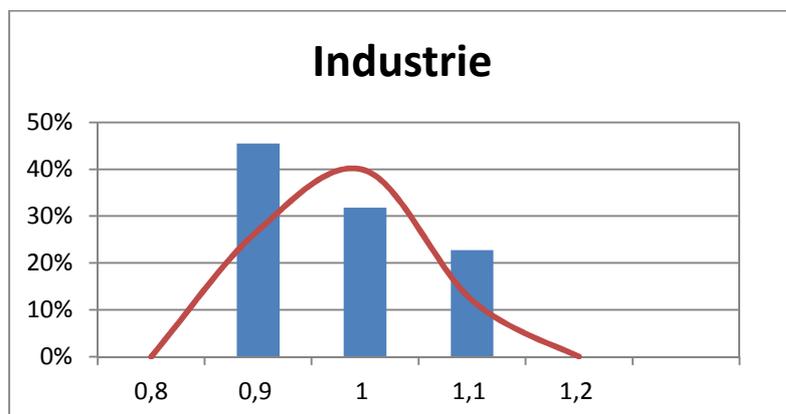


Abbildung 26: Häufigkeitsverteilung des spezifischen Strombedarfs des Industriebedarfs nach Index 1990=100 der Bevölkerungszahl und des Strombedarfs

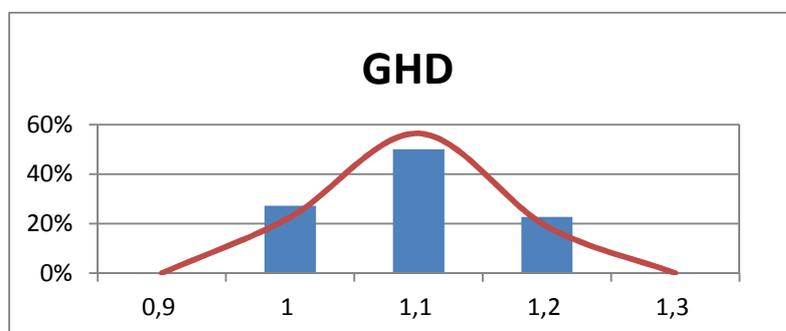


Abbildung 27: Häufigkeitsverteilung des spezifischen Strombedarfs des Gewerbe-, Handel-, Dienstleistungsbedarfs nach Index 1990=100 der Bevölkerungszahl und des Strombedarfs

Tabelle 11: Entwicklung des spezifischen Stromverbrauchs nach der Bevölkerungszahl von 1991 bis 2011

Jahr	Spezifischer Stromverbrauch [TWh/EW]			
	Haushalte	Industrie	GHD	Verkehr
1990	1,5E-06	2,6E-06	1,5E-06	1,7E-07
1991	1,5E-06	2,4E-06	1,5E-06	1,9E-07
1992	1,5E-06	2,3E-06	1,5E-06	1,8E-07
1993	1,5E-06	2,2E-06	1,5E-06	1,8E-07
1994	1,5E-06	2,3E-06	1,5E-06	1,9E-07
1995	1,6E-06	2,3E-06	1,5E-06	2,0E-07
1996	1,6E-06	2,3E-06	1,5E-06	2,0E-07
1997	1,6E-06	2,4E-06	1,6E-06	2,1E-07
1998	1,6E-06	2,4E-06	1,6E-06	2,0E-07
1999	1,6E-06	2,4E-06	1,6E-06	1,9E-07
2000	1,6E-06	2,5E-06	1,7E-06	1,9E-07
2001	1,6E-06	2,5E-06	1,6E-06	1,9E-07
2002	1,7E-06	2,5E-06	1,7E-06	1,9E-07
2003	1,7E-06	2,7E-06	1,7E-06	2,0E-07
2004	1,7E-06	2,7E-06	1,6E-06	2,0E-07
2005	1,7E-06	2,8E-06	1,6E-06	2,0E-07
2006	1,7E-06	2,8E-06	1,7E-06	2,0E-07
2007	1,7E-06	2,9E-06	1,6E-06	2,0E-07
2008	1,7E-06	2,8E-06	1,7E-06	2,0E-07
2009	1,7E-06	2,4E-06	1,7E-06	1,9E-07
2010	1,7E-06	2,7E-06	1,8E-06	2,0E-07
2011	1,7E-06	2,8E-06	1,7E-06	2,0E-07

13. Anhang 3: Prognose des Strombedarfs nach Einflussparametern**Tabelle 12: Berechnung der Gewichtung der Einflussparameter auf den jeweiligen Bedarfssektor**

	Haushalte	GHD	Verkehr	Industrie
	Abweichung			
BIP	0,10	0,08	0,09	0,13
BE	0,06	0,08	0,06	0,05
Summe	0,16	0,16	0,15	0,18
	Anteil			
BIP	63%	50%	60%	72%
BE	38%	50%	40%	28%

Tabelle 13: Abweichung zwischen historisch gemessenen Werten und errechneten Werten nach Formel 4.3

Jahr	Haushalte [TWh]		Industrie [TWh]		GHD [TWh]		Verkehr [TWh]	
	Mes- sung	Rech- nung	Mes- sung	Rech- nung	Mes- sung	Rech- nung	Mes- sung	Rech- nung
1991	122	122	194	194	117	117	15	15
1992	123	123	189	195	118	118	15	15
1993	126	124	180	196	120	119	15	16
1994	124	125	185	197	121	120	15	16
1995	127	126	190	199	124	121	16	16
1996	134	126	188	200	126	123	17	16
1997	131	127	195	201	127	124	17	16
1998	130	128	199	202	129	125	16	16
1999	131	129	201	204	129	126	16	16
2000	131	130	208	205	140	127	16	16
2001	134	131	208	206	135	128	16	17
2002	137	131	209	207	139	130	16	17
2003	139	132	219	209	136	131	16	17
2004	140	133	225	210	135	132	16	17
2005	141	134	228	211	132	133	16	17
2006	142	135	229	212	137	134	16	17
2007	140	136	236	214	133	136	16	17
2008	140	137	233	215	136	137	17	17
2009	139	138	200	216	140	138	16	18
2010	142	139	222	218	147	139	17	18
2011	137	140	227	219	141	141	17	18
Abweichung	2,5 %		4,6 %		2,6 %		4,4 %	

14. Anhang 4: Lastzeitreihen des synthetischen Lastprofils

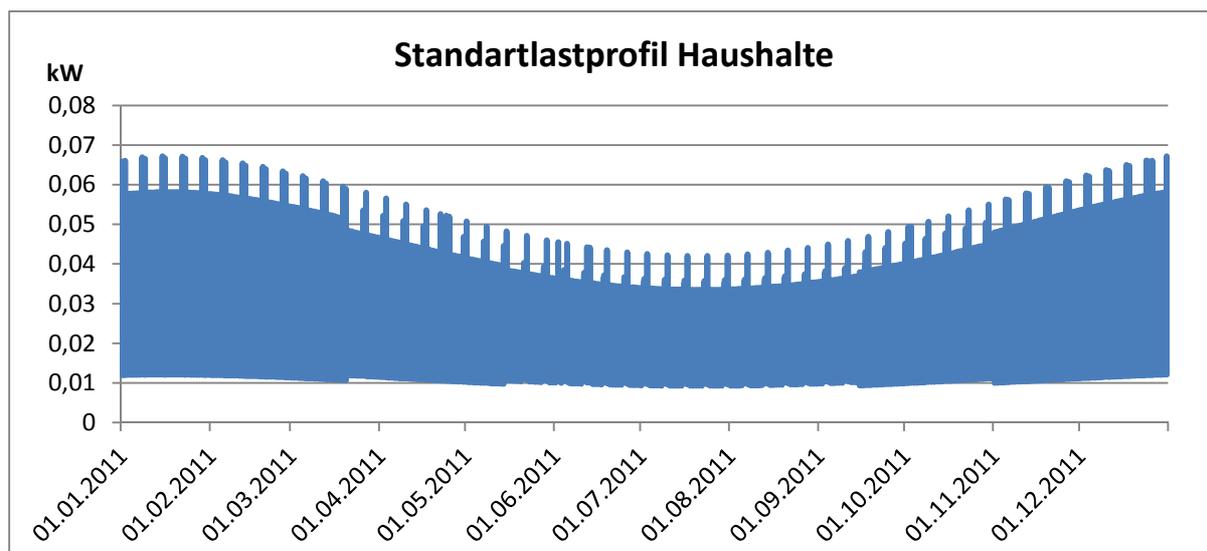


Abbildung 28: Auf 1000 kWh skaliertes Standardlastprofil Haushalte [VSG14]

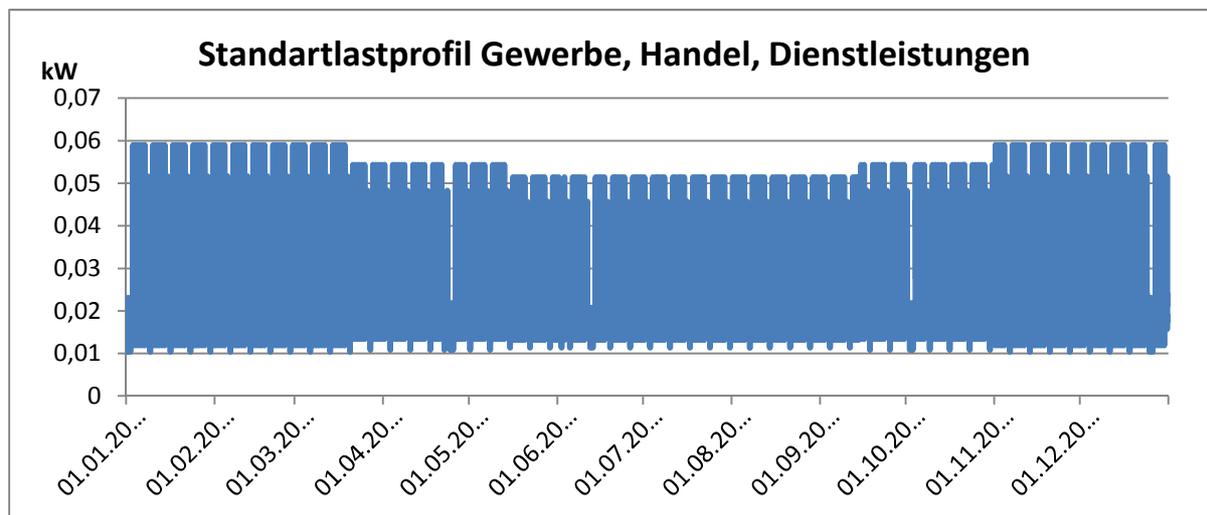


Abbildung 29: Auf 1000 kWh skaliertes Standardlastprofil GHD [VSG14]

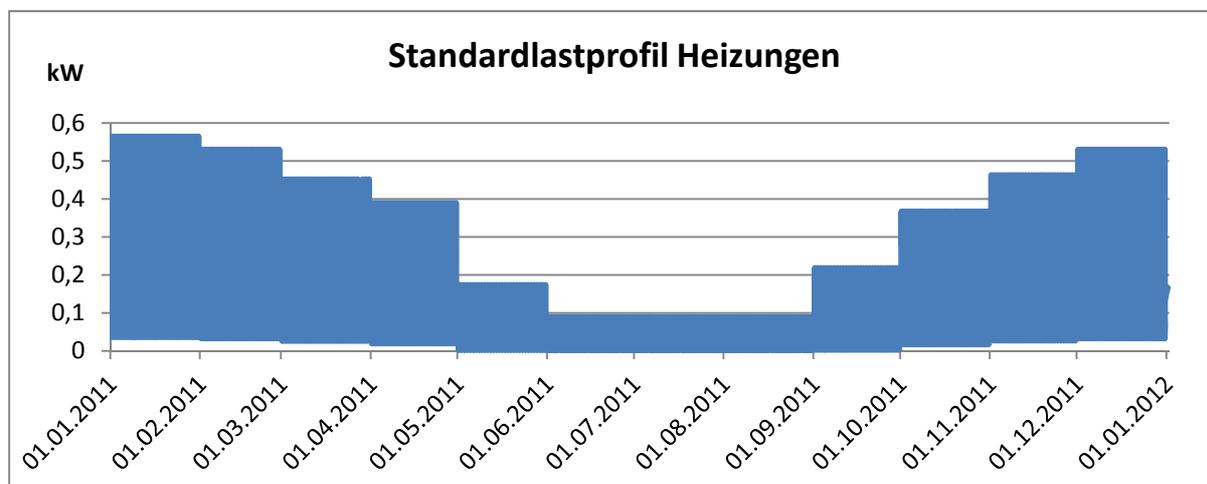


Abbildung 30: Auf 1000 kWh skaliertes Standardlastprofil Heizbedarf [STA14]

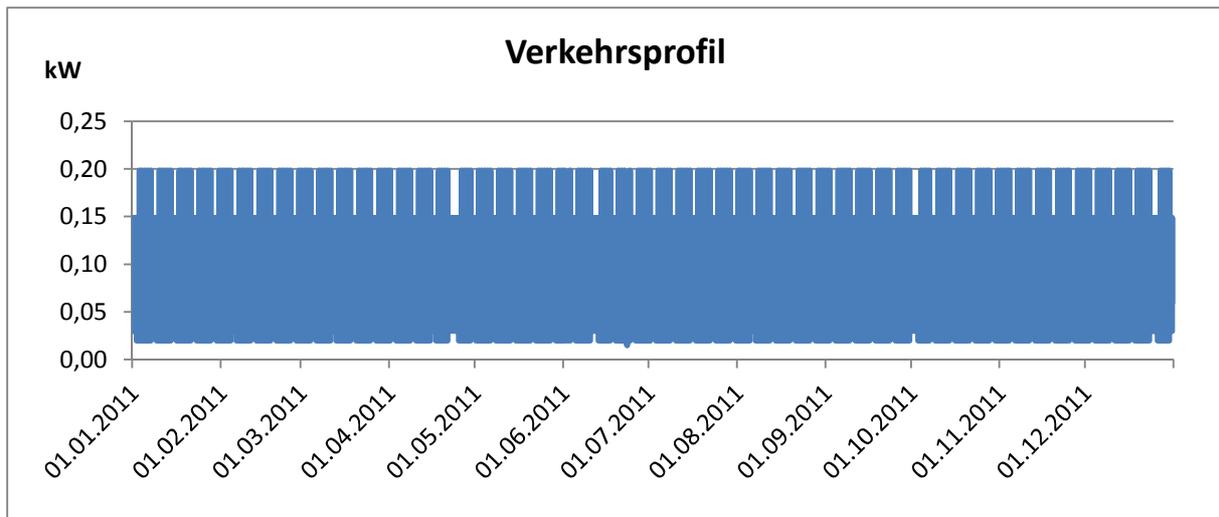


Abbildung 31: Auf 1000 kWh skaliertes Lastprofil Verkehr (Eigene Berechnung)

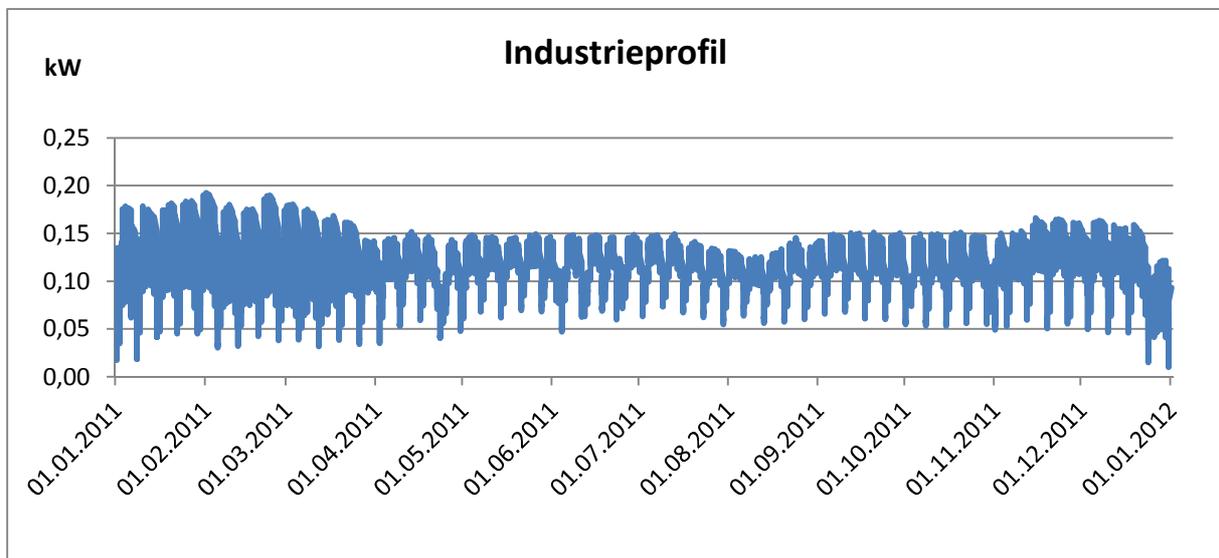


Abbildung 32: Auf 1000 kWh skaliertes Industrieprofil [FRA13]

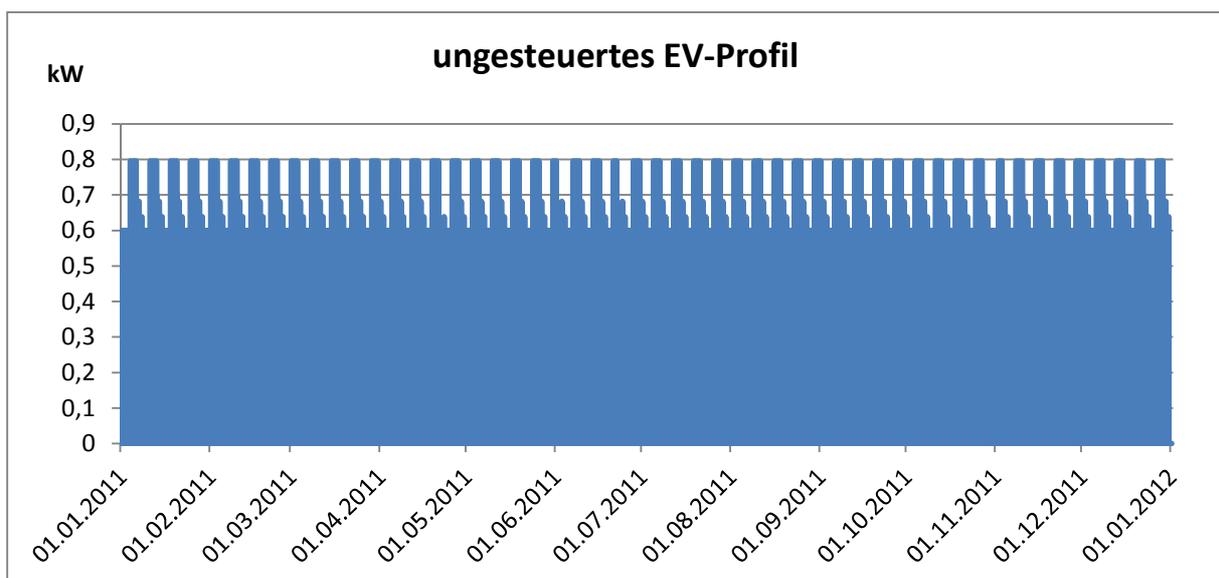


Abbildung 33: Auf 1000 kWh skaliertes Ladeprofil für das ungesteuerte Laden von EV