

1 Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V.

2 ZEDO e.V.

Name der Forschungsstellen

13115 N

AiF-Vorhaben-Nr.

1.07.02 bis 31.12.03

Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum : 1.7.2002 bis 31.12.2002

(Forschungsstellen 1 und 2 von 2)

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema :

**Systemtechnische Anforderungen
an elektrische Verteilnetze im liberalisierten Markt
bei flächendeckendem Einsatz dezentraler Energieversorgungsanlagen**

Mannheim, 3. Mai 2004

Ort, Datum

Stempel und Unterschrift des Projektleiters der FS 1

Dortmund, 30. April 2004

Ort, Datum

Stempel und Unterschrift des Projektleiters der FS 2

	Seite	
1	Forschungsthema	3
2	Zusammenfassung	3
3	Forschungsinhalt	4
	3.1 Wissenschaftliche Problemstellung	4
	3.2 Forschungsziele und Lösungsweg	6
4	Abschätzung des Potenzials für KWK-DEA	9
	4.1 Verwendete Potenzialbegriffe	9
	4.2 Erfasste Gebäude- und Infrastrukturen	10
	4.3 Projektionszeitraum	11
	4.4 Gebäudebestand und Infrastruktur der Energieversorgung	11
	4.5 Thermische und elektrische Auslegung der DEA	14
	4.6 Ergebnisse	16
5	Auswirkungen auf das elektrische Netz bei wärmegeführtem Betrieb	19
	5.1 Lastganglinien	19
	5.1.1 Elektrische Lastprofile	19
	5.1.2 Thermische Lastprofile ohne Wärmespeicher	23
	5.1.3 Thermische Lastprofile mit Wärmespeicher	24
	5.1.4 Skalierung der Last- und Einspeiseprofile	29
	5.2 Lastflussberechnung Niederspannungsnetz	31
	5.3 Lastflussberechnung Mittelspannungsnetz	35
6	Ausgleichsenergie-Potenzial	43
	6.1 Jahreszeitliche Unterschiede	43
	6.2 Niederspannungsnetz	44
	6.3 Mittelspannungsnetz	48
	6.4 Anforderungen an die Kommunikationstechnik	49
7	Schutztechnische und vertragliche Einschränkungen des Betriebes	50
	7.1 Netzschutz	50
	7.1.1 Niederspannungsebene	51
	7.1.2 Mittelspannungsebene	54
	7.2 Anlagenschutz	58
	7.3 Arbeitssicherheit	60
	7.3.1 Einhaltung der fünf Sicherheitsregeln	60
	7.3.2 Arbeiten unter Spannung (AuS)	62
	7.4 Parallelbetrieb mit dem öffentlichen Netz	62
	7.5 Vertragliche Einschränkungen durch den Netzbetreiber	64
	7.5.1 Allgemeine vertragliche Bestimmungen für die Einspeisung aus KWK-Anlagen	64
	7.5.2 Besonderheiten bei gesteuerter Einspeisung	66
8	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	67
	8.1 Investitionskosten, Strom- und Erdgaspreise, Einspeisevergütung	67
	8.2 Darbietung von Regelleistung	69
	8.3 Prognostiziertes Marktvolumen	71
9	Fazit	73
10	Literatur	76

	Seite
11 Anhang	78
11.1 Formelzeichen und Abkürzungen	78
11.2 Liste der Ortsnetzstationen in der Mittelspannung	79
11.3 Mustervertrag KWK-Stromeinspeisung	82
11.4 Mustervertrag zur beschränkten persönlichen Dienstbarkeit	127

1 Forschungsthema

Systemtechnische Anforderungen an elektrische Verteilnetze im liberalisierten Markt bei flächendeckendem Einsatz dezentraler Energieversorgungsanlagen

2 Zusammenfassung

Durch die im Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz [1] garantierte Einspeisevergütung bei dezentraler Energieerzeugung ist mit einer Zunahme wärmegeführter Erzeugungsanlagen in den kommenden Jahren zu rechnen. Ein denkbarer, flächendeckender Einsatz von dezentralen Energieerzeugungsanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplungs-Eigenschaften (KWK-DEA) kann erhebliche Auswirkungen auf die Planung und den Betrieb der elektrischen Energieversorgungsnetze haben, wenn die bisherige Top-Down-Versorgung beeinflusst und fallweise sogar umgekehrt werden sollte.

Im nachfolgend beschriebenen AiF-Forschungsvorhaben Nr. 13115N, gefördert aus Haushaltsmitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) wurden die daraus resultierenden Anforderungen an Verteilnetze untersucht.

Einen breiten Raum der Untersuchungen nehmen Betrachtungen zum technisch möglichen Umfang eines Einsatzes von KWK-DEA ein. In einem realen Netzgebiet wurden hierfür die vorhandene Gebäudestruktur und das Gasversorgungsnetz erfasst und die Ausbauzustände in die Zukunft projiziert. Das ermittelte technische Potenzial für die Einspeisung elektrischer Energie aus KWK-DEA in Wohngebäuden, das binnen 20 Jahren verwirklicht werden kann, beträgt rund 80 % der heute in diesem Gebiet auftretenden Netzhöchstlast.

Lastflussberechnungen an einem realen Niederspannungsnetz zeigen, dass sich unter extremen Bedingungen der heutige Lastfluss in vollem Betrage umkehren kann. Entsprechend diesen Ergebnissen zeigen durchgeführte Kurzschlussberechnungen am gleichen Netz, dass die KWK-DEA punktuell einen nennenswerten Beitrag zum Kurzschlussstrom liefern, der jedoch hinsichtlich der Belastung der Betriebsmittel unkritisch bleibt, wenn die Ankopplung an das Netz überwiegend über Wechselrichter erfolgt. Gegebenenfalls müssen jedoch Schutzeinrichtungen im Verteilnetz neu parametrisiert werden.

Der Einsatz thermischer Pufferspeicher erlaubt nicht nur eine verbesserte Auslastung der eingesetzten KWK-DEA sondern ermöglicht prinzipiell auch den Einsatz dieser Elemente zur Bereitstellung von Regel- oder Ausgleichsleistung. Das hierfür verfügbare Potenzial ist jedoch stark jahreszeitlich schwankend und vermutlich nur für die größeren der hier betrachteten Anlagen wirtschaftlich nutzbar.

Nicht zuletzt die Frage, ob es gelingt, kleinste KWK-DEA für Ein- und Zweifamilienhäuser ausreichend kostengünstig und zuverlässig anzubieten, wird darüber entscheiden, in welchem Umfang das prognostizierte Potenzial tatsächlich umgesetzt werden wird.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

3 Forschungsinhalt

3.1 Wissenschaftliche Problemstellung

Die Bedeutung der dezentralen Energieumwandlung nimmt in Deutschland seit einigen Jahren zu. Maßgeblichen Anteil hieran hat der jüngste Ausbau der Nutzung regenerativer Energiequellen zur Stromerzeugung. Zunächst gemäß dem Stromeinspeisungsgesetz [2], ab dem Jahr 2000 dann gemäß dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) [3] erfolgte eine gezielte Förderung einschlägiger Erzeugung, die nach Angaben des Verbands der Elektrizitätswirtschaft (VDEW) [4] einen Anstieg der in diesen Anlagen erzeugten elektrischen Energie von rund 16 TWh in 1990 auf rund 45 TWh in 2002 bewirkte. Auch wenn die in Windparks erzeugte elektrische Energie wegen der wachsenden Leistungen zunehmend direkt ins Hochspannungsnetz eingespeist wird und diese neueren Anlagen deshalb nicht mehr zu den typischen dezentralen Erzeugungsanlagen gezählt werden können, speist eine große Zahl der im genannten Zeitraum errichteten Stromerzeugungsanlagen in die Mittel- oder gar Niederspannungsebene ein.

Hinzu kommt eine zunehmende Anzahl kleiner, dezentraler Blockheizkraftwerke mit fossiler Befeuerung. So weist eine VDEW-Erhebung [5] allein zwischen 1996 und 1998 einen Anstieg dieser Blockheizkraftwerke um knapp 40% auf 3.050 Anlagen auf. Die in diesem Zeitraum errichteten 850 Neuanlagen in Deutschland hatten durchschnittlich eine installierte elektrische Leistung von nur rund 200 kW und wurden deshalb nahezu alle an Mittel- oder Niederspannungsnetze angeschlossen. Mit dem im Jahr 2000 verabschiedeten Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz [6] wurde die Förderung solcher Anlagen durch garantierte Einspeisevergütungen gesetzlich verankert. Im Jahr 2002 waren in Deutschland insgesamt bereits rund 50.000 Stromerzeugungsanlagen am Netz. Bei der weitaus überwiegenden Anzahl davon handelte es sich um kleine Anlagen, die von der Industrie oder sonstigen Privaten betrieben werden. Anlagen der Stromversorger machten nach VDEW-Angaben zahlenmäßig nur etwa ein Siebtel aus [7].

Betrachtet man den wahrscheinlichen mittel- und langfristigen Ausbau, so ist erkennbar, dass bei den erneuerbaren Energiequellen bezüglich der Anlagenleistung wie schon in den vergangenen Jahren die Windkraftanlagen dominieren werden. Hier ist vor allem der Bau großer Offshore-Windparks zu erwarten, die hinsichtlich ihrer Leistungen und ihres Netzanschlusses jedoch nicht zu den dezentralen Anlagen gerechnet werden können. Die mit der Einspeisung dieser Anlagen in das Übertragungsnetz verbundenen Auswirkungen sind deshalb nicht Gegenstand des hier beschriebenen Projekts. Der Ausbau kleiner Fotovoltaik- und Wasserkraft-Anlagen wird wegen der mangelnden Wirtschaftlichkeit (Fotovoltaikanlagen) bzw. wegen ökologischer Beschränkungen (Klein-Wasserkraftanlagen) nur in recht beschränktem Maße stattfinden, hinsichtlich der Einspeiseleistungen werden diese Anlagen auch weiterhin eine untergeordnete Rolle spielen.

Hingegen ist im Bereich kleiner und kleinster Blockheizkraftwerke, d.h. dezentraler Erzeugungseinheiten mit Kraft-Wärme-Kopplungseigenschaften (KWK-DEA), ein wesentlich größeres Potenzial vorhanden, das bei fortgeführter oder gar intensivierter öffentlicher Förderung zunehmend in den Bereich der Wirtschaftlichkeit rücken kann. Als Brennstoff kann neben nachwachsenden Rohstoffen (Biomasse) vor allem das vielerorts über das Gasnetz verfügbare Erdgas eine wesentliche Rolle übernehmen. Neben schon am Markt befindlichen Mikro-Gasturbinenanlagen traut man zukünftig vor allem Brennstoffzellenanlagen zur Hausenergieversorgung eine tragende Rolle bei der technischen Ausführung solcher KWK-DEA zu.

Die Entwicklung von Niedertemperatur-Brennstoffzellen für den Einsatz zur Hausenergieversorgung schreitet rasch voran. Derzeit laufen mehrere Feldversuche verschiedener Hersteller mit Prototypen. So führt z.B. die Firma Vaillant einen Feldversuch mit 400 Geräten für den Einsatz im Mehrfamilienhaus durch [8]. Kleinere Einheiten für Einfamilienhäuser sind geplant. Vaillant geht davon aus, im Jahr 2010 europaweit bereits 100.000 solcher Anlagen verkauft zu haben, davon rund 40.000 in Deutschland.

Ein möglicher flächendeckender Einsatz von KWK-DEA wird erhebliche Auswirkungen auf die Planung und den Betrieb der elektrischen Energieversorgungsnetze haben. Die bisher gebräuchlichen Grundsätze der Netzbetreiber für Planung und Betrieb der Netze müssen daher überprüft werden.

In Hinblick auf die Integration einzelner oder weniger Anlagen in vorhandene Verteilungsnetze liegen ausreichende Erfahrungen durch den Betrieb dezentraler Anlagen auf der Basis regenerativer Energiequellen (z.B. Fotovoltaik) oder motorischer Klein-BHKWs vor. Der Einzelbetrieb von DEA am öffentlichen Versorgungsnetz kann als Stand der Technik bezeichnet werden. Entsprechende Untersuchungen zu den eingesetzten Techniken sowie zu der Erfüllung der Anschlussbedingungen [9,10] liegen vor.

Zum möglichen großflächigen Einsatz von KWK-DEA in einem Versorgungsnetz bestehen hingegen bisher keine betrieblichen Erfahrungen; die Auswirkungen und Nutzungsmöglichkeiten dieser Anlagen sind noch nicht detailliert untersucht worden. Hierzu liegen bisher lediglich Ansätze vor.

Aus der Sicht der Netzbetriebsführung und -planung ist sowohl das Potenzial der in Form von KWK-DEA installierten Leistung wie auch deren prognostizierter Lastgang von Bedeutung. Hier sind insbesondere Fragen der Leistungsrückspeisung in überlagerte Netze, der resultierenden Betriebsmittelauslastungen, der Belastung der Betriebsmittel im Fehlerfall und des erforderlichen Schutzkonzeptes von Bedeutung. Eventuelle Einflüsse einer gemeinsamen Regelung vieler kleiner dezentraler Anlagen zum Zwecke der Ausgleichsenergiebereitstellung („virtuelles Kraftwerk“) auf die genannten Aspekte sind eine weitere zentrale Fragestellung, die bislang nicht eingehend untersucht wurde.

3.2 Forschungsziele und Lösungsweg

Die nachfolgend genannten Forschungsziele im wissenschaftlich-technischen und im wirtschaftlichen Bereich wurden angestrebt:

- Wissenschaftlich-technische Ergebnisse
 - Netzführungskonzept zum Lastmanagement unter Einbeziehung von KWK- DEA zur Bereitstellung von Ausgleichsenergie zur Deckung der Spitzenlast bzw. zum Ausgleich für stochastisch schwankende Einspeisungen unter Berücksichtigung der durch die VV II gegebenen Rahmenbedingungen.
 - Technische Anforderungen an KWK-DEA gemäß dem Netzführungskonzept.
 - Ermittlung der Auswirkungen flächendeckend eingesetzter KWK-DEA auf Spannungsqualität und Versorgungszuverlässigkeit.
 - Anforderungen an die Kommunikationstechnik zwischen BKV und VNB einerseits und den Betreibern der DEA andererseits sowie Vorschläge zur Technologie. Definition und Anwendung von Protokollen werden nicht näher behandelt.
- Wirtschaftliche Ergebnisse
 - Bestimmung von technisch und wirtschaftlich nutzbaren Potenzialen zur Spitzenlastdeckung, Regelenergiebereitstellung etc. aus KWK-DEA.
 - Kosten/Nutzenabschätzung für das o.g. Netzführungskonzept.
 - Ggf. Entwurf vertraglicher Rahmenbedingungen / Benennung eventueller Einschränkungen seitens des Netzbetreibers

Mittels der letztgenannten Punkte soll untersucht werden, inwieweit durch die aktive Integration in den Netzbetrieb die Einsatzmöglichkeiten flächendeckend eingesetzter KWK-DEA deutlich erweitert werden können. Für den Betreiber der DEA könnten sich somit neben der eigentlichen Energieumwandlung Möglichkeiten ergeben, die Wirtschaftlichkeit seiner Anlage durch die Bereitstellung von Netzdienstleistungen zu erhöhen.

Arbeitsschritt I: Abschätzung des Potenzials für die Installation von KWK-DEA

An einem realen typischen Versorgungsgebiet werden die Einsatzpotenziale für KWK-DEA, z.B. Brennstoffzellen, abgeschätzt. Ein verstärkter Einsatz ist zu erwarten, wenn die entsprechende Infrastruktur beispielsweise in Form eines Gasversorgungsnetzes im städtischen Bereich bereits vorliegt. Basis ist eine Abschätzung des Volumens altersbedingt auszutauschender Geräte. Zusätzlich werden Möglichkeiten für leistungsstärkere Installationen berücksichtigt, z.B. in Schwimmbädern.

Arbeitsschritt II: Untersuchung der technischen Auswirkungen an Beispielnetzen

Die Auswirkungen des flächendeckenden Einsatzes von KWK-DEA auf elektrische Energieversorgungsnetze werden an Beispielnetzen untersucht. Die Netzberechnungen werden für ein existierendes Mittelspannungsnetz durchgeführt. Zudem wird an einem realen Niederspannungsnetz untersucht, ob es speziell für den Einsatz der KWK-DEA optimiert werden kann bzw. modifiziert werden muss. Dies entspricht insbesondere den Aufgabenstellungen bei der Erschließung von neuen Wohngebieten und dient ggf. als Zielprojektion für die Umstrukturierung vorhandener Niederspannungsnetze.

Arbeitsschritt III: Bestimmung des technisch nutzbaren Regelpotenzials

Eine Abschätzung der Ausgleichsenergie-Potenziale aus der Sicht eines Bilanzkreisverantwortlichen (BKV) wird durchgeführt. Hierzu werden Informationen aus der Netzpraxis in Form repräsentativer Lastverläufe verwendet.

Arbeitsschritt IV: Untersuchungen zur Einsatzweise und ihrer Auswirkungen auf die benötigte Kommunikationstechnik

Die Kommunikation zwischen dem zu regelnden Gerät und der Leitzentrale muss gewährleistet sein. Die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Datenübertragung werden gemäß den voran ermittelten Ergebnissen festgelegt.

Ziel der Untersuchung ist es, ein technisch ausreichendes Konzept vorzuschlagen, um die im folgenden Arbeitsschritt V zu bestimmenden Kosten gering zu halten.

Arbeitsschritt V: Kostenabschätzung für die Schaffung der technischen Voraussetzungen zum flächendeckenden Betrieb der KWK-DEA und zur möglichen Nutzung deren Potenzials für Ausgleichsenergie

Ausgehend von den Ergebnissen des Arbeitsschrittes II sollen die Maßnahmen zur Schaffung der technischen Voraussetzungen für einen flächendeckenden Betrieb von KWK-DEA benannt und hinsichtlich der Kosten abgeschätzt werden. Hierzu gehört auch die Überprüfung des Schutzkonzeptes im Netz und, soweit notwendig, dessen Anpassung sowie Maßnahmen zur Gewährleistung der Arbeitssicherheit.

Für eine evtl. Nutzung der KWK-DEA zur Bereitstellung von Ausgleichsenergie sind die Kosten für die Realisierung von leittechnischen Funktionen sowie der Kommunikationseinrichtungen abzuschätzen.

Zielsetzung des Arbeitsschrittes V ist es, kostengünstige und pragmatische Lösungsvorschläge zu entwickeln. Die Untersuchungsergebnisse können als Empfehlungen für Netzbetreiber sowie für Hersteller dienen.

Arbeitsschritt VI: Vertragliche Einschränkungen durch den Bilanzkreisverantwortlichen (BKV) bzw. den Verteilnetzbetreiber (VNB) bei Nutzung eines möglichen Ausgleichsenergie-Potenzials der KWK-DEA

Die Einspeisung durch KWK-DEA ins Energieversorgungsnetz ist vertraglich mit dem VNB zu vereinbaren. Möchte der BKV die KWK-DEA zur Erbringung von Systemdienstleistungen heranziehen, müsste er seinerseits die Randbedingungen des gesteuerten Betriebs vertraglich mit dem DEA-Betreiber regeln. Hierbei sind mögliche Einsatzdauern und Einsatzfrequenzen festzulegen und auch abrechnungstechnische Randbedingungen zu berücksichtigen. Neben einem möglichst restriktionsfreien Zugriff durch den BKV und/oder VNB ist eine Beeinträchtigung des Betreibers zu vermeiden sowie ein wirtschaftlicher Anreiz zu schaffen. Beispielsweise können Vorschläge für eine geeignete Tarifstruktur entworfen werden. Auf vorhandene Erfahrungen beim Einsatz von Kunden-Kraftwerken (z.B. Industrie) kann zurückgegriffen werden.

Arbeitsschritt VII: Bestimmung des wirtschaftlichen Potentials

Auf der Basis der erwarteten vertraglichen Regelungen und ggf. Einschränkungen wird die Wirtschaftlichkeit untersucht. Ein sinnvoller Einsatz der KWK-DEA zur Bereitstellung von Ausgleichsenergie kann nur dann erreicht werden, wenn die Wirtschaftlichkeit für alle Beteiligten gegeben ist, sowohl für die Betreiber der KWK-DEA als auch für den BKV oder einen anderen Interessierten.

Als Ergebnis wird eine Aussage über die Frage der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von KWK-DEA getroffen.

4 Abschätzung des Potenzials für KWK-DEA

4.1 Verwendete Potenzialbegriffe

Gemäß dem im Abschnitt 3.2 definierten Arbeitsschritt I sollen die Einsatzpotenziale für KWK-DEA an einem realen typischen Versorgungsgebiet abgeschätzt werden. Hierbei muss beachtet werden, dass das Potenzial abhängig von den strukturellen, technischen und sozialen Rahmenbedingungen ist, und zudem unterschiedliche Potenzialbegriffe betrachtet werden können. Bild 4.1 zeigt einige gebräuchliche Potenzialbegriffe und ihre Relation zueinander.

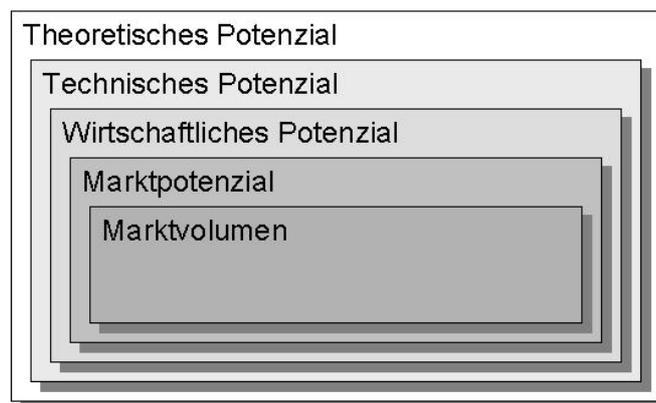


Bild 4.1 Relation gebräuchlicher Potenzialbegriffe

Das *theoretische Potenzial* beschreibt zunächst die Möglichkeit, KWK-DEA zu installieren. Hierbei kommt der gesamte Gebäudebestand im betrachteten Gebiet als Einsatzort in Frage. Die Anzahl der Anlagen wird lediglich durch die Anzahl der Gebäude beschränkt und ist für das Ableiten von Aussagen hinsichtlich des möglichen Marktvolumens wenig nutzbringend. Das *technische Potenzial* ergibt sich aus dem theoretischen Potenzial mit den Einschränkungen, die sich aus der Berücksichtigung realer technischer und struktureller Rahmenbedingungen ergeben. Maßgeblicher Faktor ist die Anzahl der (zentral-beheizten) Gebäude mit Erdgasanschluss oder zumindest der Option hierfür innerhalb eines betrachteten Zeitraums.

Das *wirtschaftliche Potenzial* ergibt sich aus der Eingrenzung auf die aus Investorsicht als wirtschaftlich definierten Anlagen. Neben des Anschaffungspreises und den laufenden Kosten (Brennstoffkosten, Wartung) einer Anlage spielt hier auch die zum Ansatz gebrachte Kapitalverzinsung und eine eventuelle öffentliche Förderung eine Rolle.

Das *Marktpotenzial* wiederum ergibt sich aus dem wirtschaftlichen Potenzial, welches um bestehende Hemmnisse geschmälert ist. So können z.B. bestehende Contracting- oder Wärmelieferverträge, aber auch Hausbesitzer, die eine bestimmte Technologie auf keinen Fall in ihrem Haus installieren wollen, zu solchen Einschränkungen führen.

Das *Marktvolumen* schließlich wird durch die realisierte bzw. prognostizierte Absatzmenge an Anlagen beschrieben und ist eine Teilmenge des Marktpotenzials. Zum derzeitigen Zeitpunkt sind insbesondere seitens der Hersteller von KWK-DEA auf Brennstoffzellenbasis nur unpräzise Aussagen über die voraussichtlichen Preise für solche Anlagen verfügbar. Da zudem die Entwicklung öffentlicher Zuschüsse und/oder garantierter Einspeisevergütungen für die mittelfristige Zukunft nicht vorhersagbar ist, ist eine Aussage über das wirtschaftliche Potenzial (und den genannten untergeordneten Potenzialen) mit sehr großen Unsicherheiten behaftet. Eine Abschätzung des Marktvolumens wird im Abschnitt 8.3 wiedergegeben.

Im folgenden soll das **technische Potenzial** ermittelt werden. Es beschreibt, wie oben bereits ausgeführt, unabhängig von der heute fehlenden Wirtschaftlichkeit und weiteren möglichen Hindernissen bei der Installation von KWK-DEA, den unter technischen und strukturellen Rahmenbedingungen maximal möglichen Umfang an solchen Anlagen. Dies erschien im Hinblick auf die Zielsetzung des Projekts auch deshalb sinnvoll, weil die ermittelten Zahlen aus der Sicht des Netzbetreibers somit ein „worst-case“-Szenario beschreiben, d.h. es ergeben sich die maximal zu erwartenden Rückwirkungen bzw. Anforderungen an das elektrische Verteilnetz. Das prognostizierte Marktvolumen bis zum Jahr 2025 variiert abhängig von den Rahmenbedingungen sehr stark und dürfte mittel- bis langfristig zwischen 3 % und 60 % vom Neuanlagenbedarf liegen [11], der bei entsprechend langem Betrachtungszeitraum praktisch dem technischen Potenzial entspricht.

4.2 Erfasste Gebäude- und Infrastrukturen

Wie bereits ausgeführt, ist ein verstärkter Einsatz von KWK-DEA dann zu erwarten, wenn die erforderliche Infrastruktur in Form eines Gasversorgungsnetzes bereits vorliegt. Basis für die Potenzialschätzung des betrachteten Gebietes ist das Volumen der dort innerhalb eines Betrachtungszeitraums altersbedingt auszutauschenden Geräte. Sie setzt sich somit aus der Anzahl und der Größe der Gebäude wie auch der Möglichkeit ihres Anschlusses an das Gasnetzzusammen.

Das in diesem Projekt untersuchte Netzgebiet entspricht im wesentlichen dem der HEAG Südhessische Energie (HSE) AG. Es umfasst eine Fläche von knapp 2.000 km² in Südhessen mit insgesamt rund 715.000 Einwohnern.

Für die Potenzialschätzung wurden im Rahmen dieses Projekts insgesamt mehr als 158.000 Wohngebäude im genannten Gebiet betrachtet. Erfasst wurde hierbei neben der Anzahl der Wohn- und Gewerbeeinheiten in den Gebäuden auch die Möglichkeit einer Gasversorgung sowie die Gemeindezugehörigkeit. Hieraus ergab sich, dass von den oben genannten Gebäuden 130.700 bzw. 83 % in solchen Gemeinden stehen, in denen ein Gasversorgungsnetz prinzipiell vorhanden ist.

Leider war eine Aufschlüsselung der Gebäude nach Alter nicht verfügbar, weshalb der Zustand der Wärmeisolation, neben der Gebäudegröße wesentlicher Faktor für den Heizenergiebedarf, nur anhand von Vergleichszahlen abgeschätzt werden konnte.

4.3 Projektionszeitraum

Da neue Techniken wie Brennstoffzellenanlagen zur Hausenergieversorgung zum Teil erst in den kommenden Jahren als Serienmodelle zur Verfügung stehen werden, und der Ersatz aller bestehenden Heizanlagen erst typischerweise innerhalb eines Zeitraums von 15 bis 20 Jahren vollzogen wird, ist es sinnvoll, die Potenzialbetrachtung für einen in der Zukunft liegenden Stichtag durchzuführen. Beachtet werden muss hierbei, dass der Gebäudebestand wie auch die Infrastruktur (das Gasnetz) in der Zwischenzeit ausgebaut werden. Für die Potenzialabschätzung ist deshalb eine Projektion beider das Potenzial beeinflussenden Größen über einen geeignet gewählten Zeitraum erforderlich.

Um sowohl ein breites Angebot an Anlagen in allen Größenklassen erwarten zu können als auch einen ausreichenden Zeitraum für die Umrüstung auf ein alternatives Heizsystem bei bestehenden Gebäuden vorzusehen, wurde das technische Potenzial für das Jahr 2023 abgeschätzt. Das heißt, ausgehend vom vorhandenen Datenmaterial für das Jahr 2003 muss der die Entwicklung des Gebäudebestands und des Gasnetzes über einen Zeitraum von 20 Jahren in die Zukunft projiziert werden.

4.4 Gebäudebestand und Infrastruktur der Energieversorgung

Die wie unter 4.2 erwähnt 130.700 Wohngebäude in gasversorgten Gemeinden des betrachteten Netzgebiets werden in acht Klassen unterteilt, in denen jeweils gleiche Größen für zu installierende KWK-DEA angenommen werden sollen, um die Zahl der nachzubildenden Typen überschaubar zu halten. Hinzu kommen zwei weitere Gebäudeklassen nicht bewohnter Gebäude: zum einen Wärmegroßverbraucher wie Schwimmbäder, Kliniken etc., zum anderen große öffentliche Einrichtungen wie Schulen, Sporthallen und Verwaltungsgebäude.

Gebäude, in denen nur Gewerbeeinheiten untergebracht sind, blieben bei den nachfolgend dargestellten Ergebnissen der Potenzialschätzung für den gesamten Netzbereich zunächst ebenso unberücksichtigt wie zusätzliche Gewerbeeinheiten in den erfassten und berücksichtigten Wohngebäuden. Der Grund hierfür ist die weite Streuung des Wärmebedarfs innerhalb der Kategorie „Gewerbe“. Z. B. liegt der Wärmebedarf eines Einzelhandel-Ladens oder eines Gewerbebetriebs mit wenigen Büroräumen unter Umständen unterhalb dessen einer Wohneinheit. Ein mittelständischer Fertigungsbetrieb oder ein Industrieunternehmen, evtl. mit Prozesswärmebedarf, kann dagegen einen Wärmebedarf aufweisen, der jenen einer einzelnen Wohneinheit um ein Vielfaches übersteigt. Da eine Aufgliederung nach Gewebetyp für die nur zahlenmäßig erfassten Gewerbeeinheiten nicht verfügbar war, konnte eine Berücksichtigung von Gewerbebetrieben nur in der Betrachtung räumlich begrenzter Teilnetze erfolgen (Abschnitt 5).

Tabelle 4.1 zeigt die Aufteilung der erfassten und berücksichtigten Gebäude in Gemeinden mit Gasversorgung innerhalb des untersuchten Gebietes.

Tabelle 4.1 Gebäudebestand in den gasversorgten Gemeinden des untersuchten Netzgebiets und dessen Klassifizierung, Stand 2003

Kl.	Gebäudetyp	Anzahl
I	Schwimmbäder etc	32
II	Schulen, Sporthallen, etc.	319
III	1 Wohneinheit	74.551
IV	2 - 3 Wohneinheiten	42.028
V	4 - 7 Wohneinheiten	9.594
VI	8 - 15 Wohneinheiten	3.828
VII	16 -25 Wohneinheiten	389
VIII	26 - 45 Wohneinheiten	203
IX	46 -75 Wohneinheiten	78
X	mehr als 75 Wohneinheiten	29

Für die Projektion in das Jahr 2023 wurden drei Korrekturfaktoren eingeführt, die die Veränderung der Anzahl der potenziell mit KWK-DEA ausrüstbaren Gebäude berücksichtigen sollen:

- **Korrekturfaktor A**

Mit diesem Faktor soll berücksichtigt werden, welcher Anteil der Gebäude in innerhalb der gasversorgten Gemeinden bis zum Jahre 2023 tatsächlich einen Gasanschluss erhalten kann. Es wurde angenommen, dass dies bei 90 % der Gebäude der Klassen III und IV (Ein- bis Dreifamilienhäuser), 95 % der Gebäude der Klasse V (Gebäude mit 4 bis 7 Wohneinheiten) und alle Gebäude aller anderen in Tabelle 4.1 genannten Klassen Erdgas beziehen können. Für das Gasleitungsnetz wurde angenommen, dass es nicht auf weitere Gemeinden ausgedehnt wird.

- **Korrekturfaktor B**

Aufgrund von Neubauten wird sich der in Tabelle 4.1 angegebene Bestand in den kommenden 20 Jahren erhöhen. Dies, aber auch die Bestandsabnahme durch Abriss ist in der Projektion zu berücksichtigen. Mittels verfügbarer Daten des statistischen Landesamtes [12] konnten die Bestandszunahmen getrennt für Einfamilienhäuser, Zweifamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser für die Stadt Darmstadt wie auch für das Land Hessen für die Jahre 1999 und 2000 ermittelt werden. Aus dem durchschnittlichen Bestandszuwachs in diesen beiden Jahren und unter Berücksichtigung der zukünftig wahrscheinlich etwas verringerten Neubauquote wurden Prognosen für die Bestandsänderung bis zum Jahr 2023 erstellt.

Die errechneten Faktoren B, getrennt für Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser erstellt, sind aus Tabelle 4.2 zu ersehen. Für öffentliche Gebäude wurde der gleiche Faktor für die Bestandszunahme wie für Mehrfamilienhäuser angenommen.

Tabelle 4.2 Bestandszuwächse für Einfamilienhäuser (1-FH), Zweifamilienhäuser (2-FH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) in der Stadt Darmstadt (DA) und im Land Hessen [12]; Prognose für Bestandszuwachs in 20 Jahren

	1999		2000		Durchschnitt		Projektion 20 J.	
	DA	Hessen	DA	Hessen	DA	Hessen	jährlich	B
1-FH	0,63%	1,00%	1,13%	0,98%	0,88%	0,99%	0,90%	119,6%
2-FH	0,67%	1,18%	0,45%	0,85%	0,56%	1,01%	0,50%	110,5%
MFH	0,40%	1,21%	0,46%	0,91%	0,43%	1,06%	0,50%	110,5%

- Korrekturfaktor C

Um bei der thermischen und elektrischen Auslegung der KWK-DEA (siehe Abschnitt 4.5) eine möglichst geringe, überschaubare Anzahl von Anlagengrößen ermitteln zu müssen, wurde eine Aussage für den durchschnittlichen Heizwärmebedarf der zehn gewählten Gebäudeklassen im Jahr 2023 angestrebt, so dass basierend auf dieser Zahl für jede Gebäudeklasse nur eine („durchschnittliche“) KWK-DEA auszulegen ist. Als Referenz-Heizwärmebedarf wurde ein solcher angenommen, der einer Wärmeisolation eines gleichen Gebäudes gemäß dem Niveau der Wärmeschutzverordnung von 1982 (WSchV 1982) entspricht, d.h. durchschnittlich etwa 130 bis 170 kWh/m² mit steigender Tendenz hin zu kleineren Einheiten. Aufgrund des derzeitigen und zukünftigen Standes der Wärmeisolation wurde als worst-case-Abschätzung im Sinne größtmöglicher Anlagen und somit Rückwirkungen auf das elektrische Verteilnetz für Mehrfamilienhäuser im Jahr 2023 ein Wärmebedarf von 106% des Referenzwertes angenommen. Aufgrund der höheren Quote von Neubauten, die bereits alle den deutlich geringeren Heizwärmebedarf gemäß der Energieeinsparverordnung von 2002 (EnEV 2002) aufweisen werden, und wegen der wahrscheinlicheren Sanierung älterer Gebäude aufgrund einfacherer Besitzverhältnisse wurde angenommen, dass Einfamilienhäuser und öffentliche Gebäude in 2023 durchschnittlich etwa 25% unter diesem Wert, d.h. bei etwa 79% des Referenzwertes liegen werden.

In Tabelle 4.3 sind die genannten Korrekturfaktoren für jede der zehn gewählten Gebäudeklassen aufgeführt. Aus der Multiplikation der heutigen Gebäudezahlen mit den jeweiligen drei Faktoren ergibt sich für die Projektion in das Jahr 2023 eine prognostizierte, fiktive Anzahl von Gebäuden, die im Durchschnitt eine Wärmeisolation gemäß dem Niveau der WSchV 1982 aufweisen und innerhalb des Projektionszeitraums an das

Gasnetz angeschlossen werden können. Dies erlaubt für die Auslegung der KWK-DEA die Betrachtung von nur zehn „Referenzgebäuden“ basierend auf den zehn gewählten Gebäudeklassen.

Tabelle 4.3 Korrekturfaktoren A, B und C und Projektion des Gebäudebestands in 2023

Kl.	Gebäudetyp	Anzahl heute	Korrekturfaktor A (Gasversorgung)	Korrekturfaktor B (Bestands- änderung)	Korrekturfaktor C (relativer Wärmebedarf)	Projektion 2023
I	Schwimmbäder etc.	32	1,00	1,105	0,79	28
II	Schulen, Sporth., Verw.	319	1,00	1,105	0,79	278
III	Einfamilienhäuser	74.551	0,90	1,196	0,79	63.395
IV	2 – 3 Wohneinheiten	42.028	0,90	1,105	1,06	44.305
V	4 – 7 Wohneinheiten	9.594	0,95	1,105	1,06	10.676
VI	8 – 15 Wohneinheiten	3.828	1,00	1,105	1,06	4.484
VII	16 – 25 Wohneinheiten	389	1,00	1,105	1,06	456
VIII	26 – 45 Wohneinheiten	203	1,00	1,105	1,06	238
IX	46 – 75 Wohneinheiten	78	1,00	1,105	1,06	91
X	> 75 Wohneinheiten	29	1,00	1,105	1,06	34

4.5 Thermische und elektrische Auslegung der DEA

Um möglichst realistische Einheitengrößen der KWK-DEA für die zehn definierten Referenzgebäude zu erhalten, wurde eine thermische Auslegung mit Hilfe des BHKW-Planungs- und Projektierungsprogramms BHKW-Plan [13] vorgenommen. Dafür wurde zunächst für jedes Referenz-Wohngebäude die Wohnfläche gemäß statistischer Daten [12] und der erfassten Zusammensetzung der Gebäude innerhalb jeder Klasse ermittelt, siehe Tabelle 4.4.

Danach wurden für Gebäude entsprechender Größe und einer thermischen Isolation gemäß der Wärmeschutzverordnung von 1982 die thermischen Bemessungsleistungen der KWK-DEA für die acht Referenz-Wohngebäude projektiert. Für die öffentlichen Gebäude wurden typische Ausführungsbeispiele aus der Datenbank zu [13] gewählt.

Tabelle 4.4 Berechnung der Wohnfläche der Referenz-Wohngebäude (Klassen III bis X) aufgrund der durchschnittlichen Anzahl der Wohneinheiten der erfassten Gebäude in jeder Klasse sowie der durchschnittlichen Wohnungsgröße nach [12]

Kl.	Gebäudetyp	Durchschnittl. Anzahl Wohneinh.	Durchschnittl. Wohnungsgröße	Gesamt-wohnfläche
III	Einfamilienhaus	1	128,0 m ²	128 m²
IV	2–3 Wohneinh.	2,259	91,0 m ²	206 m²
V	4–7 Wohneinh.	5,136	75,2 m ²	386 m²
VI	8–15 Wohneinh.	9,623	66,8 m ²	643 m²
VII	16–25 Wohneinh.	19,203	63,8 m ²	1225 m²
VIII	26–45 Wohneinh.	33,675	63,8 m ²	2148 m²
IX	46–75 Wohneinh.	56,436	63,8 m ²	3601 m²
X	> 75 Wohneinh.	98,536	63,8 m ²	6287 m²

Als Randbedingungen wurde angenommen, dass unter ökonomischen Gesichtspunkten eine Benutzungsdauer der äquivalenten Volllast von 5000 h/a angestrebt wird und thermische Speicher zur besseren Auslastung der KWK-DEA eingesetzt werden. Der über die von der KWK-DEA bzw. dem Speicher zur Verfügung gestellten thermischen Leistung hinausgehenden Wärmebedarf muss durch zusätzlich installierte Spitzenlastanlagen (z.B. Gas-Brennwertkessel) gedeckt werden.

Tabelle 4.5 gibt die Ergebnisse der Auslegung wieder, wobei bei den verwendeten Größen auf derzeit schon vorhandene bzw. in Planung befindliche Typengrößen zurückgegriffen wurde. Deshalb ergeben sich z.B. die gleichen Anlagengrößen das Referenz-Einfamilienhaus (Kl. III) und das Referenz-Zwei-bis-Dreifamilienhaus (Kl. IV).

Da der Wärmebedarf von neueren Gebäuden deutlich rückläufig ist, der Strombedarf und die Vergütung des eingespeisten Stromes zukünftig aber möglicherweise ansteigt, wurde im wiederum im Sinne einer worst-case-Abschätzung für die Rückwirkungen auf das elektrische Verteilnetz angenommen, dass alle eingesetzten KWK-DEA mit einer Stromkennzahl (= Verhältnis von elektrischer Bemessungsleistung P_{el} zu thermischer Bemessungsleistung P_{th}) von mindestens 0,8 eingesetzt werden. Die entsprechenden Bemessungsleistungen sind in der letzten Spalte der Tabelle 4.5 zu finden.

Tabelle 4.5 Ergebnisse der Auslegung gemäß heutiger Stromkennzahlen und angenommener Stromkennzahl von mindestens 0,8

Kl.	heutige Bemessungsleistungen		Stromkennzahl mind. 0,8
	P_{therm}	P_{el}	P_{el}
I	392,0 kW	224,0 kW	313,6 kW
II	532,0 kW	600,0 kW	600,0 kW
III	3,6 kW	1,9 kW	2,9 kW
IV	3,6 kW	1,9 kW	2,9 kW
V	8,7 kW	4,8 kW	7,0 kW
VI	12,5 kW	4,7 kW	10,0 kW
VII	22,0 kW	8,0 kW	17,6 kW
VIII	48,0 kW	25,0 kW	38,4 kW
IX	75,0 kW	43,0 kW	60,0 kW
X	142,0 kW	88,0 kW	113,6 kW

4.6 Ergebnisse

Unter den voran genannten Annahmen und Randbedingungen ist es möglich, durch Multiplikation der fiktiven, prognostizierten Anlagenzahl und der ermittelten elektrischen Bemessungsleistungen die in der Summe im betrachteten Netzgebiet durch KWK-DEA mögliche installierte elektrische Leistung zu berechnen. Dies ist in der Tabelle 4.6 ausgeführt und führt zu einem technischen Potenzial von knapp 632 MW. Das entspricht rund 80 % der in 2002 im betrachteten Netzbereich gemessenen Höchstlast von 780 MW.

Anzumerken ist, dass es sich hierbei einerseits um eine Potenzialabschätzung unter worst-case-Bedingungen handelt (mit großen angenommenen elektrischen Bemessungsleistungen), andererseits die in Gewerbebetrieben potenziell zum Einsatz kommenden KWK-DEA unberücksichtigt blieben. Dieses nicht unbeträchtliche Potenzial kann das technische Potenzial unter worst-case-Bedingungen ohne weiteres über den Sockel der Netzhöchstlast hinaus anheben. Daraus kann abgeleitet werden, dass bei Volllastbetrieb aller potenziell installierter KWK-DEA (im Winter) auch bei Betrachtung eines größeren Netzbereichs mit zum Teil ländlichen Strukturen und nicht-flächendeckender Gasversorgung mit Rückspeisung elektrischer Leistung in das überlagerte Übertragungsnetz zu rechnen ist.

Tabelle 4.6 Zusammensetzung des technischen Potenzials der installierten elektrischen Leistung im betrachteten Netzgebiet;

¹⁾ fiktiver Wert auf der Basis der definierten Referenzgebäude

Kl.	Anlagenzahl ¹⁾	P _{el, Einzelanlage}	P _{el, Gesamt}
I	28	313,6 kW	8,76 MW
II	278	600,0 kW	167,08 MW
III	63.395	2,9 kW	182,58 MW
IV	44.305	2,9 kW	127,60 MW
V	10.676	7,0 kW	74,30 MW
VI	4.484	10,0 kW	44,84 MW
VII	456	17,6 kW	8,02 MW
VIII	238	38,4 kW	9,13 MW
IX	91	60,0 kW	5,48 MW
X	34	113,6 kW	3,86 MW
Σ	123.985		631,65 MW

Bild 4.2 verdeutlicht jedoch, dass rund die Hälfte des prognostizierten technischen Potenzials auf KWK-DEA in Ein- bis Dreifamilienhäuser verteilt ist. Diese Anlagen weisen eine kleine thermische und elektrische Bemessungsleistung auf. Bisher zeichnet sich nicht ab, dass der Einsatz solch kleiner Anlagen zukünftig wirtschaftlich möglich sein wird. Falls dieser Anteil aus wirtschaftlichen Gründen wegbrechen wird, reduziert sich das Potenzial der in Wohngebäuden und öffentlichen Gebäuden installierten Leistung auf gut 320 MW, wovon wiederum mehr als die Hälfte in den öffentlichen Gebäuden installiert wird, so dass dann die Investitionsbereitschaft öffentlicher Träger als die maßgebliche Größe für die Umsetzung des Potenzials anzusehen ist.

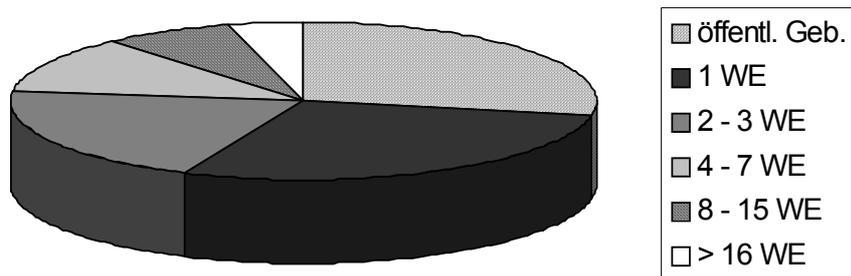


Bild 4.2 Anteile der verschiedenen Gebäudeklassen am technischen Potenzial der installierten KWK-DEA-Leistung

5 Auswirkungen auf das elektrische Netz bei wärmegeführtem Betrieb

Ziel der Untersuchung sind die Auswirkungen auf das elektrische Netz bei wärmegeführtem Betrieb von KWK-DEA sowohl in Bezug auf die Auslastung der einzelnen Betriebsmittel als auch auf die Leistung, die bedingt durch die dezentrale Einspeisung in die jeweils überlagerte Spannungsebene zurückgespeist wird.

5.1 Lastganglinien

Um die Auswirkungen einer wärmegeführten Betriebsweise zu untersuchen, müssen neben elektrischen Lastprofilen auch die thermischen Lastganglinien betrachtet werden. Da für das Forschungsprojekt vornehmlich Extremalbetrachtungen von Belang sind, und eine genaue Lastprognose von untergeordneter Bedeutung ist, werden hier ausschließlich Werk- und Sonntage unterschieden. Samstagsverläufe werden näherungsweise als Kombination aus Sonn- und Werktagsprofilen betrachtet und deshalb im Folgenden vernachlässigt.

5.1.1 Elektrische Lastprofile

Für die elektrischen Lastgänge sind Standardlastprofile (SLP) seitens der HEAG Süd-hessische Energie AG zur Verfügung gestellt worden. Diese umfassen neben einer wochentagsabhängigen Differenzierung in Werk-, Sams- und Sonntage eine Unterscheidung in eine Haushaltsklasse sowie in 7 Gewerbe- und 3 Landwirtschaftskategorien. Dabei wird das Haushaltsprofil durch eine Dynamisierungsfunktion auf die jeweiligen Jahrestage angepasst, die in tabellarischer Form im Lieferumfang der elektrischen Lastprofile enthalten ist.

Neben der schon genannten Vernachlässigung von Samstagen wird hier nicht ein komplettes Jahr sondern es werden der Übersichtlichkeit halber exemplarisch die Jahreszeiten Winter, Übergang (Frühjahr/Herbst) und Sommer betrachtet, für die Referenztage gemäß Tabelle 5.1 gewählt worden sind.

Tabelle 5.1: Zuordnung der Referenztage

Jahreszeit	Referenztage
Winter	15. Januar
Übergang	15. April
Sommer	15. Juni

Bei der Betrachtung der Lastprofile der Gewerbebetriebe ist festzustellen, dass eine starke Ähnlichkeit bei den Gewerbekategorien G2 und G4 (s. Tabelle 5.2) vorliegt. In den Abendstunden auftretende Unterschiede können in Hinblick auf die Zielsetzung des Forschungsvorhabens vernachlässigt werden. Dies ermöglicht zur Erhöhung der Übersichtlichkeit eine Zusammenfassung der Kategorien G2 und G4. Aufgrund des höheren Vorkommens der Gewerbekategorie G4 im betrachteten Netzbereich ist die Gewerbekategorie G2 als näherungsweise äquivalent zur Gewerbeklasse G4 betrachtet worden. Zudem treten die Klassen G0, G5 und G6 in den hier betrachteten Netzen nicht bzw. nur so vereinzelt auf, dass sie vernachlässigt werden können.

Tabelle 5.2: Betrachtete Gewerbekategorien

SLP-Kategorie	Beschreibung	Kommentar
G0	Gewerbe allgemein	vernachlässigt
G1	Gewerbe 8 ⁰⁰ -18 ⁰⁰	
G2	Gewerbe mit starkem bis überwiegendem Verbrauch in den Abendstunden	Näherungsweise Betrachtung als Kategorie G4
G3	Gewerbe durchlaufend	
G4	Läden/Friseure/Arztpraxen	
G5	Bäckerei mit Backstube	vernachlässigt
G6	Wochenendbetrieb	vernachlässigt

In den verschiedenen Niederspannungsnetzen liegen Mischvorkommen aus Haushalten und Gewerben vor. Hier ist die jeweilige Verteilung der einzelnen Profiltypen analysiert worden. Dabei ist der am stärksten vertretene Profiltyp identifiziert worden, dem dann vereinfachend das gesamte Niederspannungsnetz zugeordnet worden ist. Eine genaue Zuordnung der einzelnen Niederspannungsnetze zu den Profilklassen kann Anhang 11.2 entnommen werden.

Entsprechend den oben angeführten Annahmen konnte die Anzahl der für die nachfolgenden Betrachtungen verwendeten elektrischen Lastprofilklassen auf vier reduziert werden. Diese Verläufe sind in Bild 5.1 bis Bild 5.4 dargestellt.

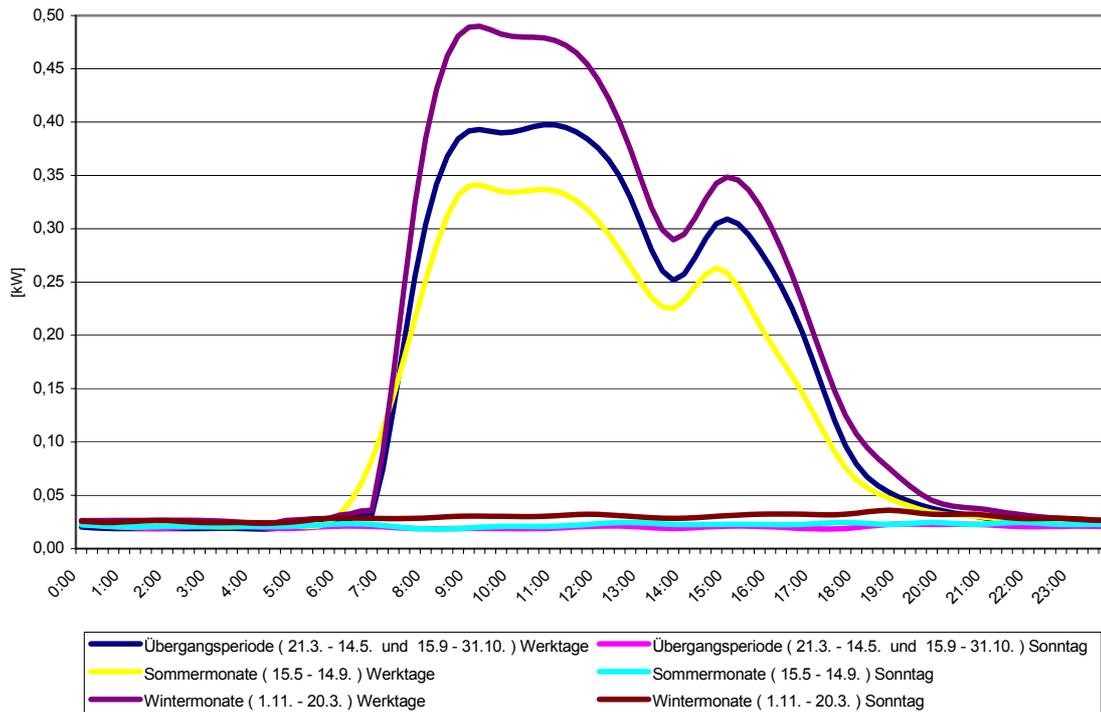


Bild 5.1: Elektrische Lastprofile G1 normiert auf 1000 kWh/a

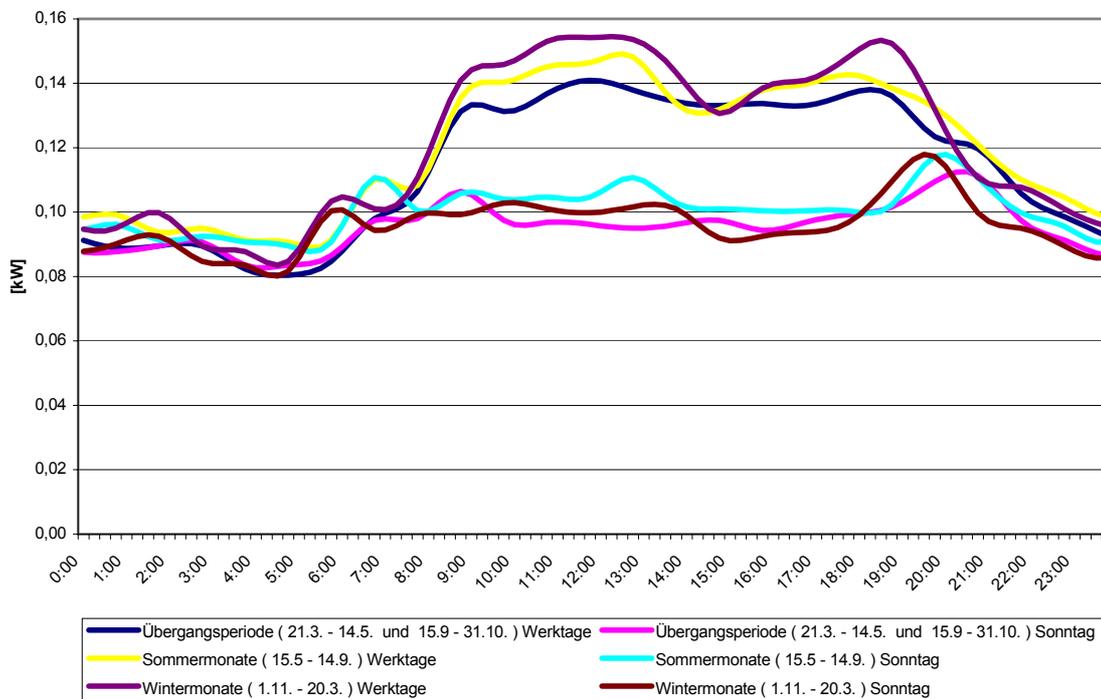


Bild 5.2: Elektrische Lastprofile G3 normiert auf 1000 kWh/a

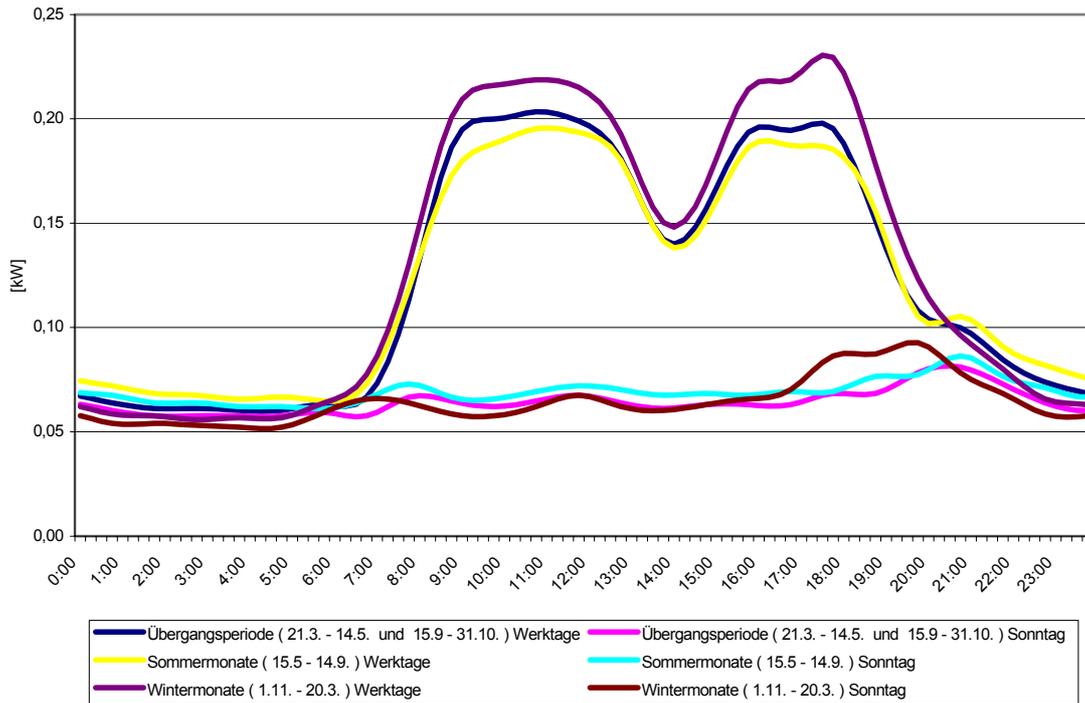


Bild 5.3: Elektrische Lastprofile G4 normiert auf 1000 kWh/a

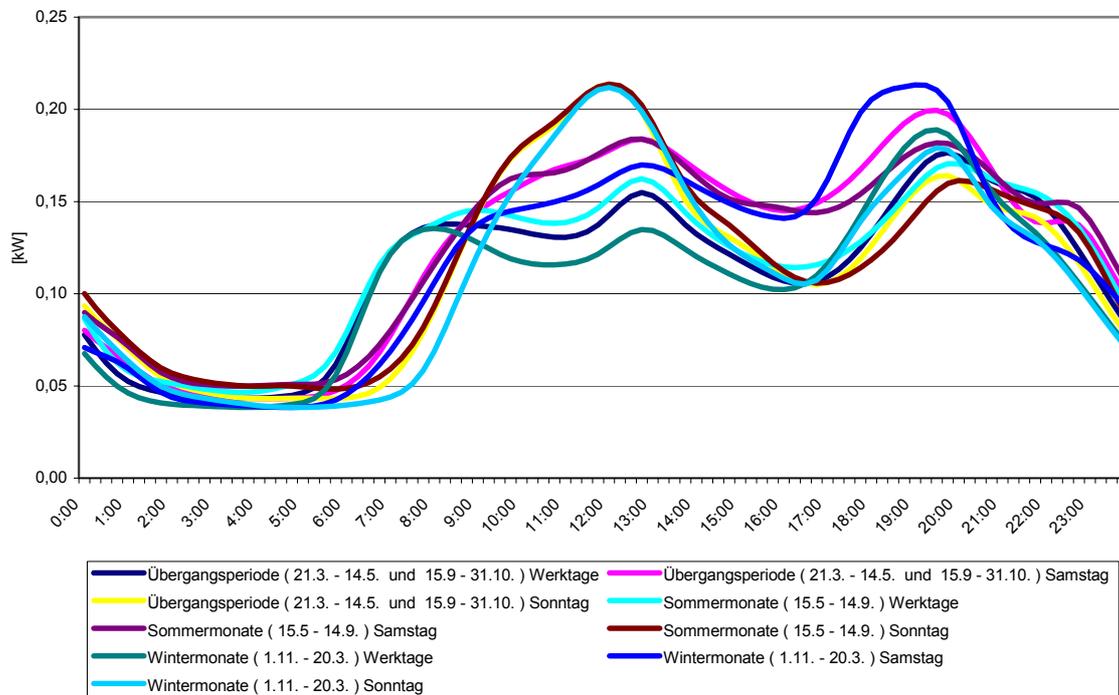


Bild 5.4: Elektrische Lastprofile Haushalte normiert auf 1000 kWh/a

5.1.2 Thermische Lastprofile ohne Wärmespeicher

Wie oben bereits erwähnt, müssen neben elektrischen Lastprofilen thermische Lastprofile betrachtet werden, um das Einspeiseverhalten der DEA zu charakterisieren. Aufgrund von nicht verfügbaren thermischen Lastprofilen für einzelne Gebäude, ist hier auf das Planungsprogramm BHKW-Plan [13] zurückgegriffen worden. Diese Software liefert neben den Bemessungsanforderungen für Klein-Blockheizkraftwerke (BHKW) auch thermische Lastprofile. Zur Durchführung der Lastflussberechnungen sind entsprechende Profile zugrundegelegt worden, die für die Abschnitt 4.4 eingeführten Gebäudeklassen I-X ermittelt worden sind. Aufgrund der Tatsache, dass hier vornehmlich Wohngebäude betrachtet werden, die im Allgemeinen saisonal, aber nicht wochentagsdifferenziert, beheizt werden, wurde auf eine Unterteilung der einzelnen Profilklassen in verschiedene Wochentage verzichtet.

Es ergeben sich jahreszeitlich schwankend erhebliche Unterschiede bei der erforderlichen Wärmeleistung für die Referenzgebäude der verschiedenen Klassen. Diese werden im Folgenden anhand des Referenz-Einfamilienhauses verdeutlicht (Bild 5.5). Im Winter beträgt der Wärmebedarf während des Tages durchschnittlich etwa 6 kW und pendelt an einem Frühjahrstag in der gleichen Zeit zwischen etwa 1 kW und 2 kW. Im Sommer wird der Wärmebedarf praktisch ausschließlich durch den Warmwasserbedarf bestimmt, so dass die gemittelten Stundenwerte stets unterhalb von 0,5 kW verbleiben. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit zur Begrenzung der thermischen Bemessungsleistung der KWK-DEA, da sonst die Anzahl der äquivalenten Volllaststunden pro Jahr zu gering wird, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen. Der über die thermische Bemessungsleistung der KWK-DEA hinausgehende Leistungsbedarf ist durch einen thermischen Pufferspeicher und durch einen thermischen Spitzenlastkessel abzudecken.

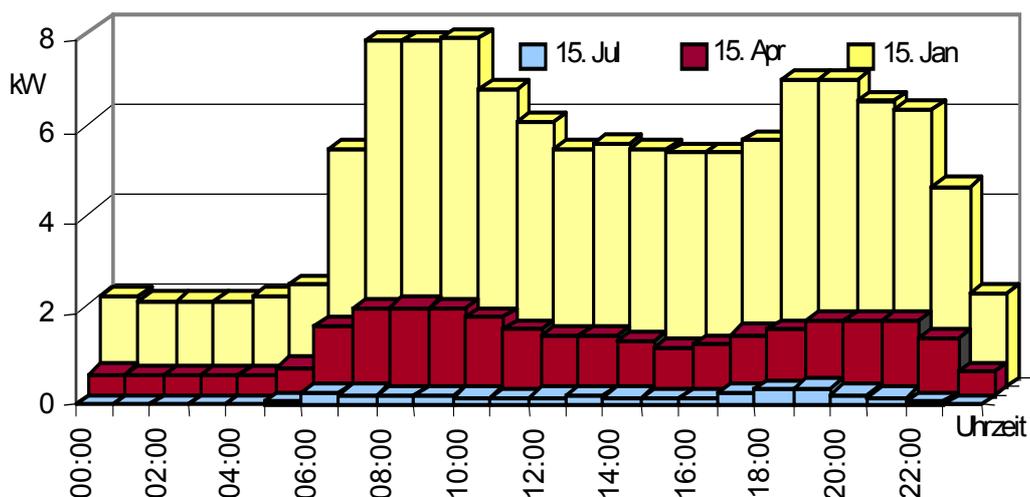


Bild 5.5: Thermischer Bedarf eines Referenz-Einfamilienhauses

5.1.3 Thermische Lastprofile mit Wärmespeicher

Während die jahreszeitlichen Schwankungen des Wärmebedarfs nicht durch Speicher auszugleichen sind, können die täglichen Schwankungen durch den Einsatz eines entsprechend bemessenen Speichers soweit ausgeglichen werden, dass eine KWK-DEA besser ausgelastet wird. Bild 5.6 zeigt den Einfluss eines thermischen Pufferspeichers mit einem Energievolumen von 17 kWh auf die von einer KWK-DEA in einem Referenz-Einfamilienhaus abgegebene thermische Leistung an einem Wintertag.

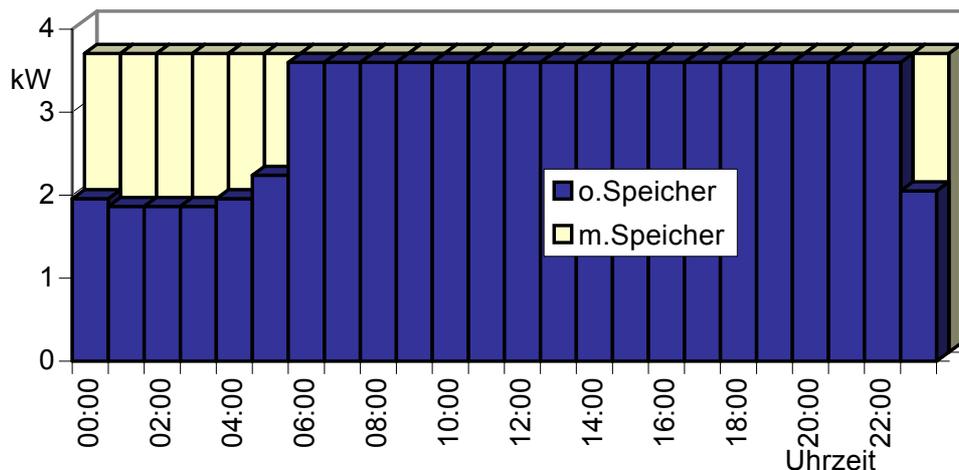


Bild 5.6: Einfluss eines thermischen Pufferspeichers auf das Lastprofil des Referenz-Einfamilienhauses an einem Wintertag

Durch den Einsatz des Pufferspeichers wird auch in der Nacht ein Betrieb der KWK-DEA mit Bemessungsleistung möglich. Die gespeicherte Wärmeenergie wird am Tage, wenn der Wärmebedarf über 3,6 kW hinaus steigt (vgl. Bild 5.5), vom Speicher wieder abgegeben.

Neben dem Auffüllen von Minima im Lastprofil ermöglicht der Pufferspeicher ebenfalls eine höherer Auslastung der KWK-DEA, indem er längeren Teillastbetrieb ermöglicht. Durch Zwischenspeicherung von Energie für Zeiten, in denen der Wärmebedarf des Gebäudes unterhalb der unteren Grenzleistung der KWK-DEA liegt, kann die Zahl der äquivalenten Volllaststunden pro Jahr weiter erhöht werden. Im benutzten Modell liegt die untere thermische Grenzleistung der KWK-DEA bei 30% der Bemessungsleistung. Diese liegt bei einem Referenz-Einfamilienhaus bei etwa 1,1 kW. Somit ist dieser Effekt vor allem im Sommer und zur Übergangszeit von Relevanz, wenn der Wärmebedarf zeitweise oder ständig unter die 1,1-kW-Grenze fällt. Bild 5.7 zeigt den Einfluss des Pufferspeichers auf die von einer KWK-DEA für ein Referenz-Einfamilienhaus abgegebene Leistung an einem Übergangstag (15. April).

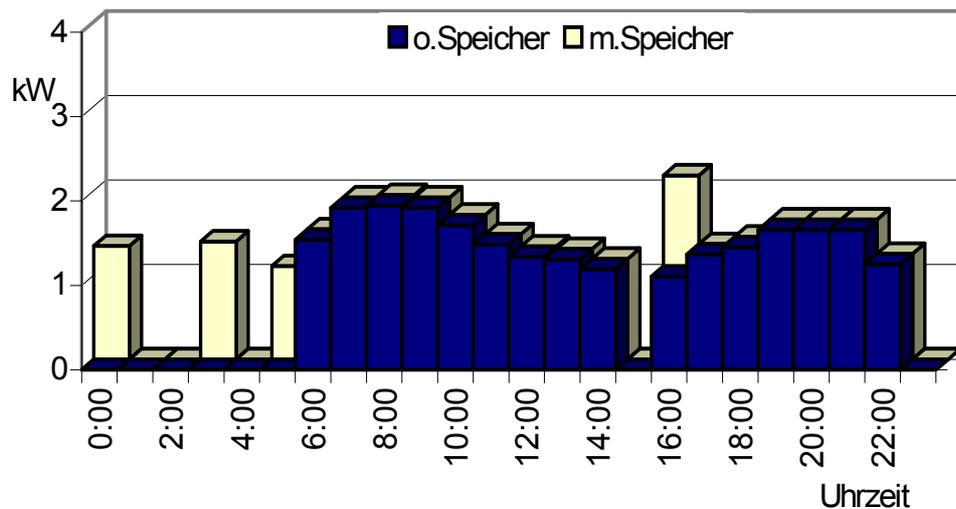


Bild 5.7: Einfluss eines thermischen Pufferspeichers auf das Lastprofil des Referenz-Einfamilienhauses an einem Übergangstag

Mit Hilfe des Speichers kann der gesamte Wärmebedarf an diesem Tag von der KWK-DEA geliefert werden. In Zeiten, in denen der Wärmebedarf die untere Grenzleistung unterschreitet, wird entweder Wärmeleistung aus dem Speicher entnommen oder die KWK-DEA bei mindestens ihrer Grenzleistung betrieben. Im letzteren Fall wird die überschüssige Wärmeleistung im Puffer gespeichert. Diese Betriebsweise führt zu einer zeitlich stark schwankenden erzeugten Leistung, was sich aufgrund der konstant angenommenen Stromkennzahl auch im Bereich der Stromerzeugung bemerkbar macht.

Im Sommerbetrieb genügt es, wenn die KWK-DEA, wie in Bild 5.8 dargestellt, für nur eine Betriebsstunde bei voller Leistung betrieben wird. Der Pufferspeicher wird soweit geladen, dass der gesamte Wärmebedarf (vornehmlich Warmwasser) hieraus gedeckt werden kann. Bei dieser Betriebsweise ist der entsprechenden Sprung in der Stromproduktion der KWK-DEA besonders groß, was jedoch nur bei einer Gleichzeitigkeit des einstündigen Betriebs vieler Anlagen zu unerwünschten Auswirkungen auf das elektrische Verteilnetz führt (siehe Ergebnisse der Lastflussberechnungen für einen Sommertag, z.B. im Abschnitt 5.2).

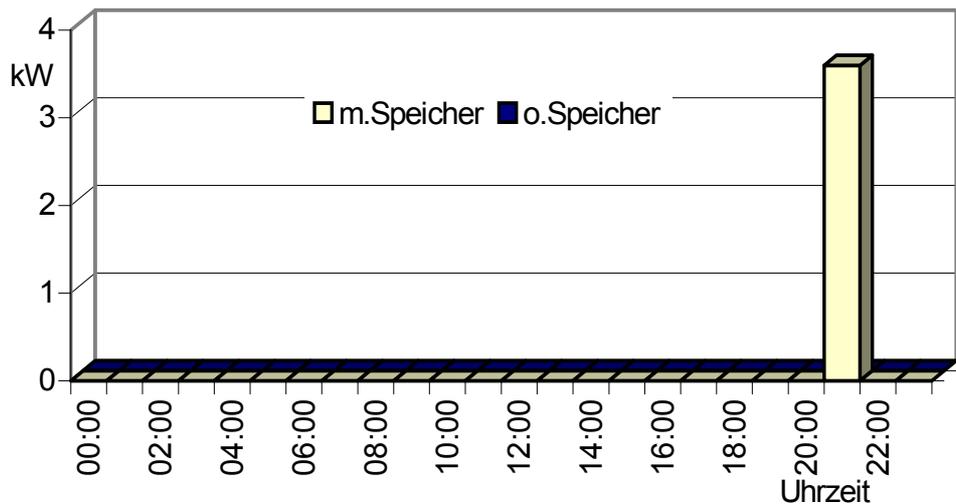


Bild 5.8: Einfluss eines thermischen Pufferspeichers auf das Lastprofil des Referenz-Einfamilienhauses an einem Sommertag

Bei der Bestimmung der thermischen Lastgangprofile ist die Verwendung von Wärmespeichern mit einer Kapazität gemäß Tabelle 5.3 angenommen worden. Eine gebäudescharfe Betrachtung ist lediglich für die Analyse des Niederspannungsnetzes notwendig. In dem hier vorliegenden Referenznetz kommen ausschließlich die Gebäudeklassen III, IV, V und VI vor. Die entsprechenden Lastprofile sind in Bild 5.10 bis Bild 5.13 angegeben.

Tabelle 5.3: Verwendete Speichergrößen

Gebäudeklasse	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Speicher [kWh]	17	17	17	17	17	17	17	23	35	116

Bei der Analyse des Mittelspannungsnetzes sind verschiedene Sondervertragskunden zu berücksichtigen. Hierbei handelt es sich um Gewerbekunden, bei denen jeweils eine installierte KWK-DEA angenommen wird. Im Gewerbebereich müssen aufgrund der hohen Individualität der einzelnen Verbraucher die thermische Lastprofile korrekterweise verbraucherscharf erstellt werden. Der Aufwand sowohl zur Recherche der notwendigen Daten als auch bei der Erstellung der Profile ist im Vergleich zu dem Ziel „Prognose in 20 Jahren“ aber als ungerechtfertigt hoch anzusehen. Deshalb wird hier vereinfachend angenommen, dass alle Gewerbekunden mit einer KWK-DEA einspeisen, die dem thermischen Lastprofil der Gebäudeklasse II (Bürogebäude) folgt, siehe Bild 5.9. Dieses Profil wird dann entsprechend der Gewerbegröße skaliert.

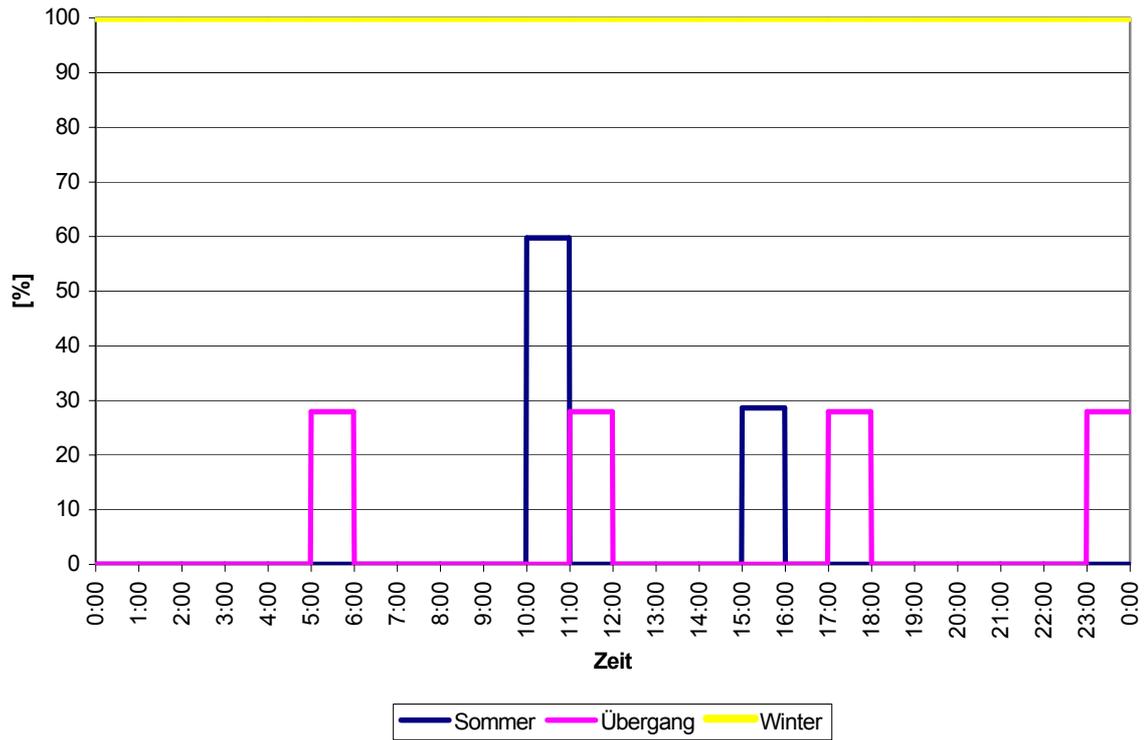


Bild 5.9: Lastprofile Klasse II (Gewerbeeinspeisungen)

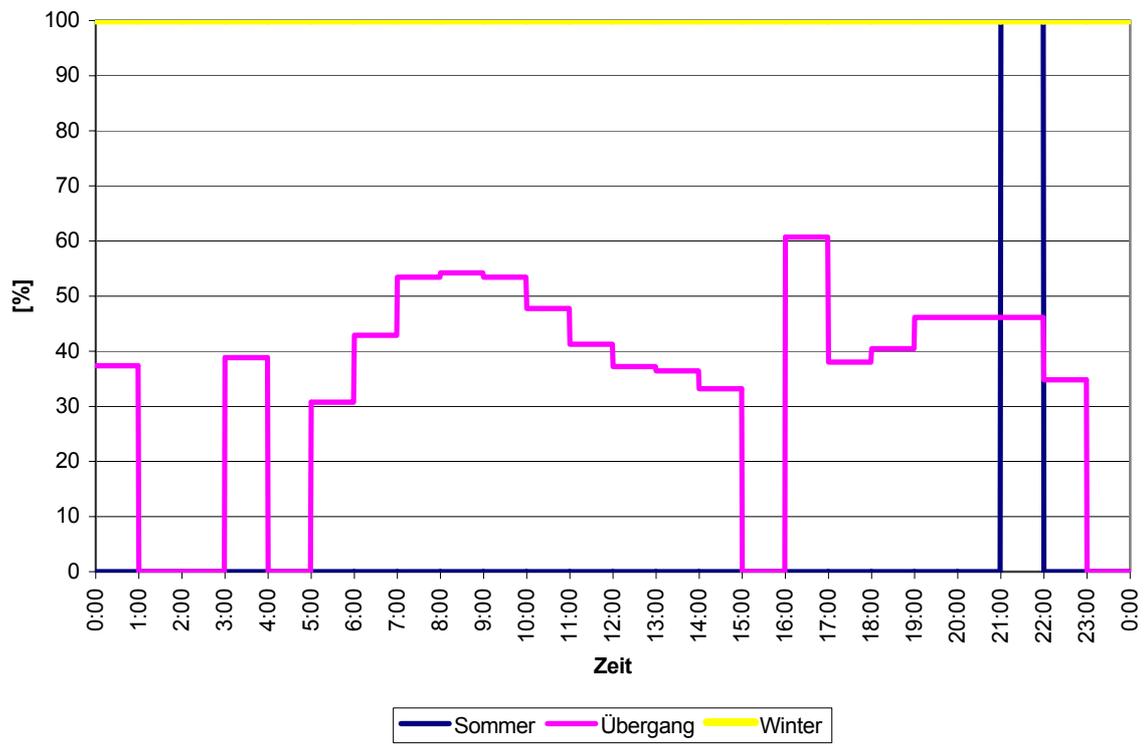


Bild 5.10: Lastprofile Klasse III (Einfamilienhäuser)

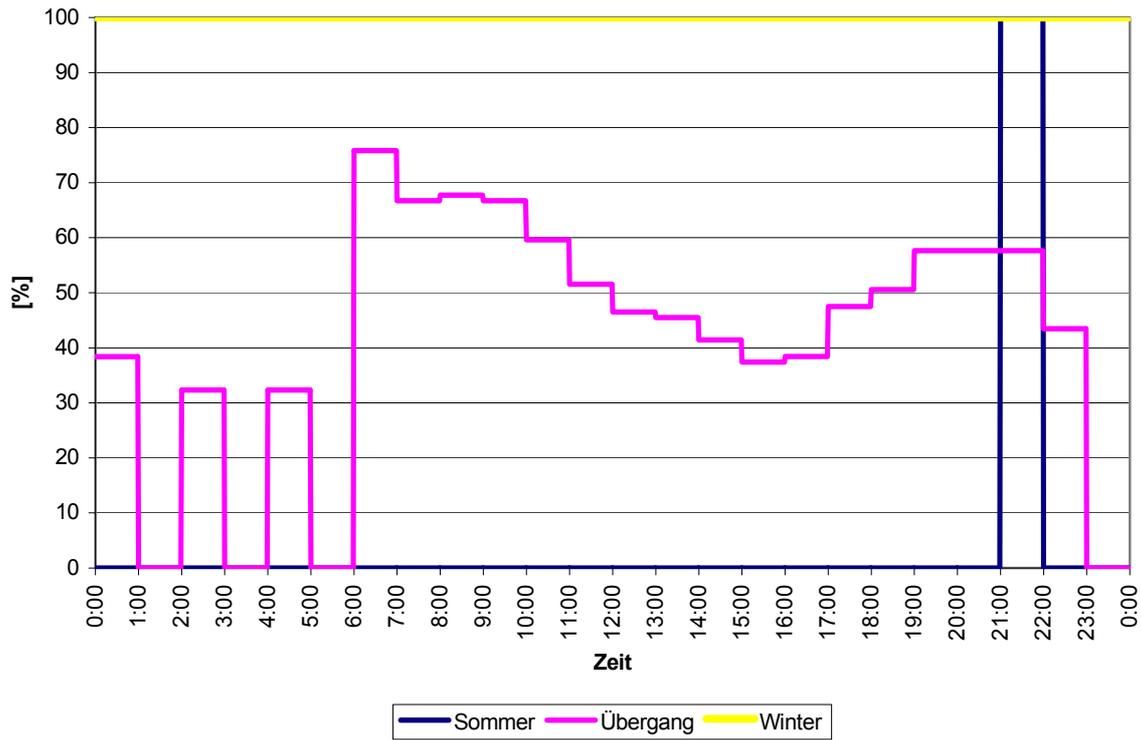


Bild 5.11: Lastprofile Klasse IV (Zwei- bis Dreifamilienhäuser)

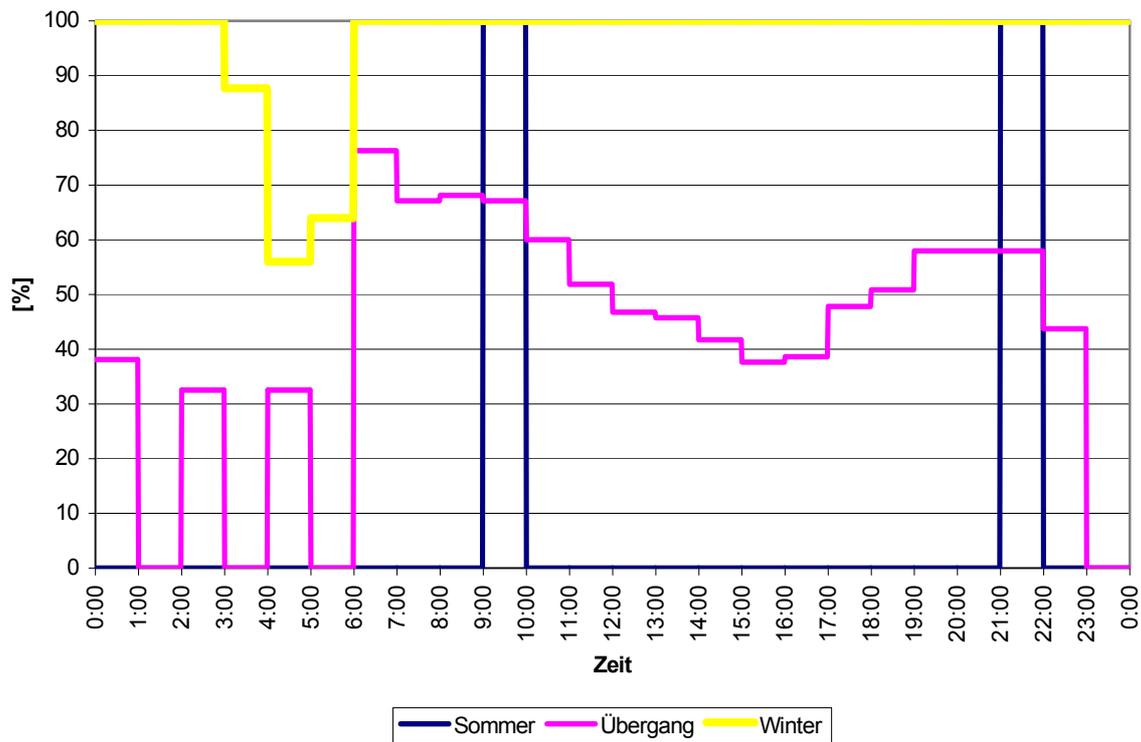


Bild 5.12: Lastprofile Klasse V (Gebäude mit 4 bis 7 Wohneinheiten)

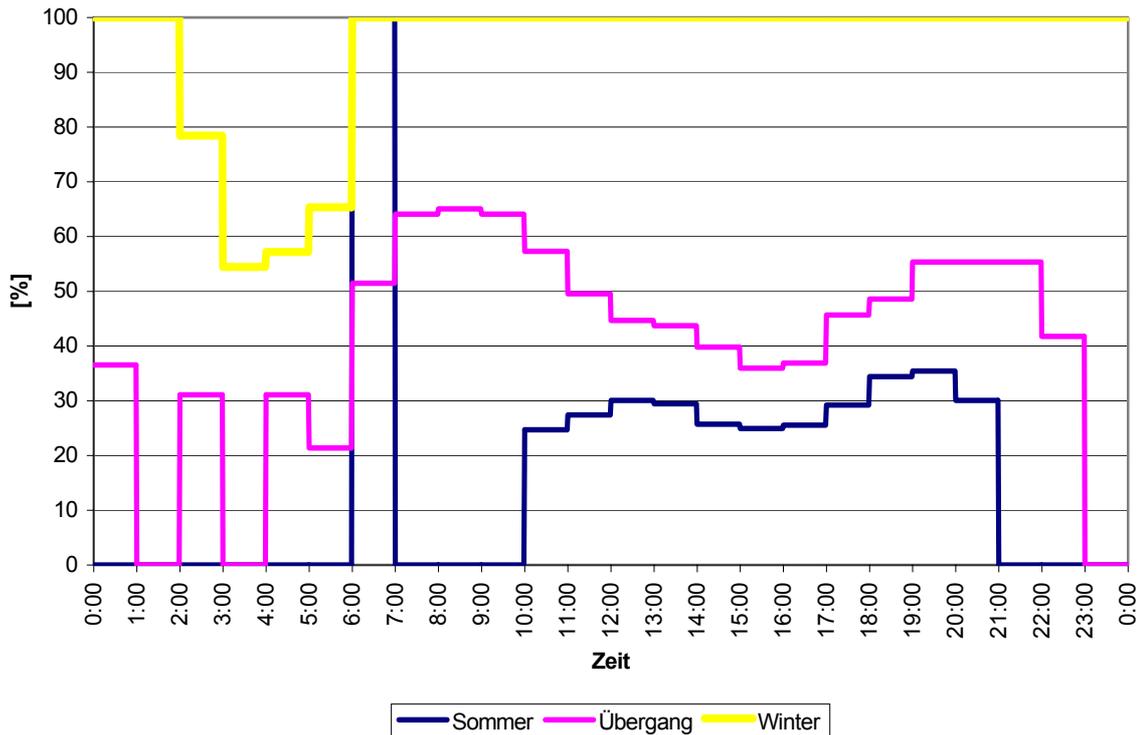


Bild 5.13: Lastprofile Klasse VI (Gebäude mit 8 bis 15 Wohneinheiten)

5.1.4 Skalierung der Last- und Einspeiseprofile

Das Referenzniederspannungsnetz enthält ausschließlich Wohngebäude. Für jedes dieser Objekte sind elektrische und thermische Lastprofile notwendig. Entsprechend Erhebungen des Statistischen Bundesamts [14] wurde von einem jährlichen Stromverbrauch von 3.500 kWh je Wohneinheit ausgegangen, auf den die elektrischen Lastprofile skaliert worden sind. Für die Einspeisungen sind thermische und elektrische Bemessungsleistungen der KWK-DEA gemäß Tabelle 4.6 angenommen worden.

Bei der Analyse des Mittelspannungsnetzes sind die unterlagerten Niederspannungsnetze und die darin installierten Verbraucher nicht scharf modelliert worden. Stattdessen wurde das errechnete Bilanzprofil für das unter Abschnitt 5.2 untersuchte Niederspannungsnetz differenziert in Einspeisung und Verbrauch allen anderen Niederspannungsnetzen zugeordnet und in seiner Höhe entsprechend dem Verhältnis der Maximallasten skaliert. Der gesamte Skalierungsprozess ist in Bild 5.14 dargestellt und gliedert sich in zwei Zweige. Zunächst wurden alle Lastprofile auf das Jahresmaximum bezogen, um ein Normprofil in % zu erhalten. Diesem Normprofil kann dann die Bemessungsleistung der jeweiligen KWK-DEA zugeordnet werden, die dementsprechend die maximale Einspeiseleistung darstellt.

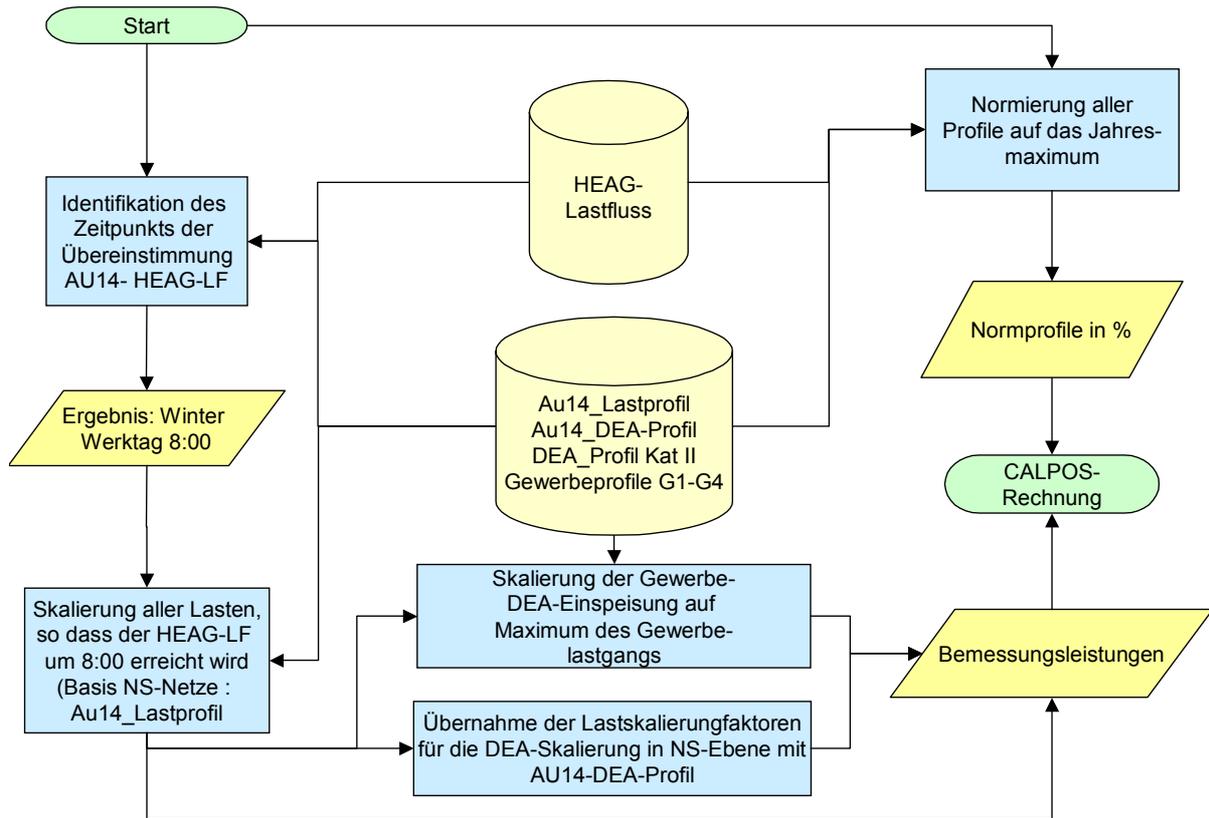


Bild 5.14: Skalierungsverfahren in der Mittelspannungsebene

Die Bestimmung der Bemessungsleistungen für ein bestimmtes Niederspannungsnetz basiert auf einer vorhandenen Lastflussrechnung der HEAG Südthessische Energie AG. Dabei handelt es sich um eine statische Lastflussberechnung ausschließlich im Mittelspannungsbereich. Zunächst ist mit dem Zeitpunkt „Winter Werktag 8:00“ der Zeitpunkt bestimmt worden, an dem die Abweichung der HEAG-Rechnung am geringsten von der hier benutzten Profilrechnung abweicht. Anschließend ist die Niederspannungs-Summenlast derart skaliert worden, dass die Werte der Lastflussrechnung der HEAG Südthessische Energie AG unter Verwendung der o.a. Lastprofile am entsprechenden Zeitpunkt erreicht werden.

Mit Hilfe des gleichen Skalierungsfaktors ist dann die Bemessungs-Summeneinspeisung bestimmt worden. Die Bestimmung der Bemessungsleistung der im Mittelspannungsnetz angeschlossenen Gewerbelasten erfolgt analog unter Verwendung der o.a. Gewerbelastprofile. Schließlich ist die Bemessungsleistung der korrespondierenden KWK-DEA auf das Maximum des resultierenden Gewerbelastganges gelegt worden. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass sich auch zukünftig für Gewerbebetreibende kein wirtschaftlicher Anreiz für eine höhere Energieeinspeisung in das elektrische Verteilnetz ergibt. Folglich ist als Worst-Case-Szenario maximaler dezentraler Einspeisung der Fall der autarken Versorgung mit Auslegung der KWK-DEA auf die Lastspitze des jeweiligen Gewerbes angenommen worden.

5.2 Lastflussberechnung Niederspannungsnetz

Um die Auswirkungen einer flächendeckenden dezentralen Einspeisung auf das elektrische Verteilnetz zu beurteilen, sind Lastflussrechnungen an einem realen Niederspannungsnetz vorgenommen worden. Bei dem Netz handelt es sich um ein Maschennetz, das in der in Bild 5.15 gezeigten Strahlnetztopologie betrieben wird. Die dargestellten Hauptversorgungsstränge sind größtenteils durch $4 \times 150 \text{ mm}^2$ Aluminiumleitungen realisiert worden; teilweise liegen auch kleinere Leitungen mit einem Querschnitt von mindestens 95 mm^2 vor.

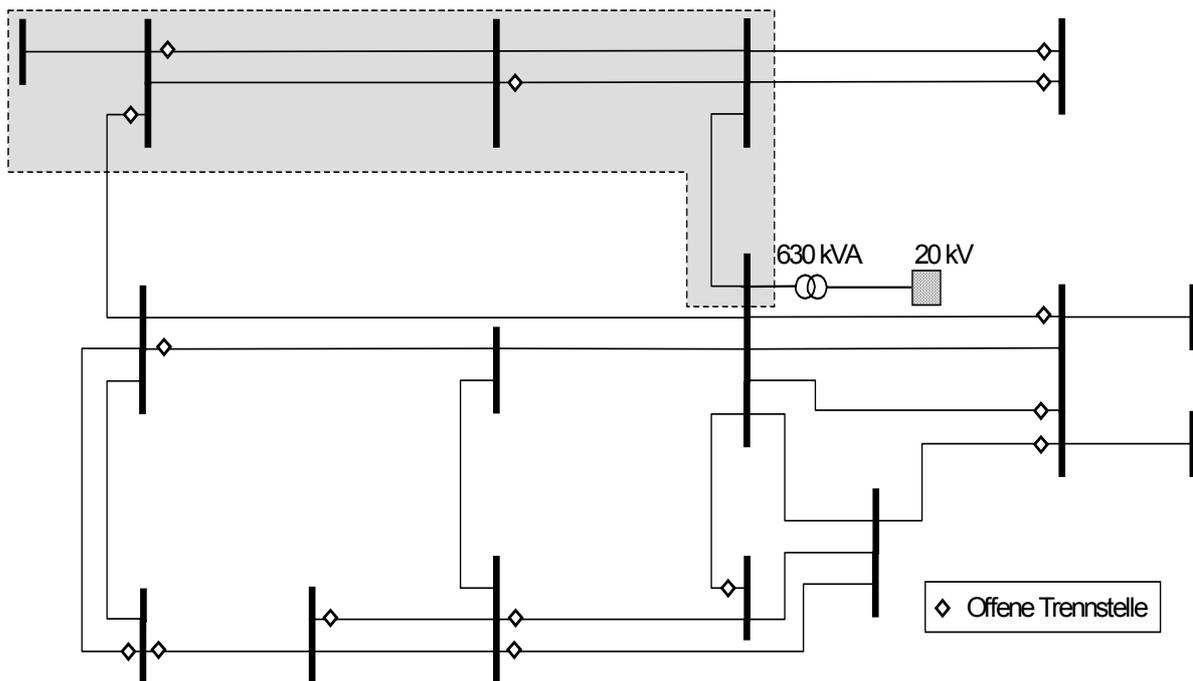


Bild 5.15: Struktur des analysierten Niederspannungsnetzes

Das Versorgungsgebiet des Netzes ist ein städtisches Wohngebiet, in dem vornehmlich Ein- und Zweifamilienhäuser - d.h. Objekte der Klassen III und IV - vorzufinden sind. Insgesamt werden 120 Wohngebäude mit 240 Wohneinheiten versorgt. Eine detaillierte Aufschlüsselung ist Tabelle 5.4 zu entnehmen.

Die Gewerbeeinheiten, bei denen es sich hier um einen kleinen Lebensmittelmarkt und verschiedene Kleinbetriebe handelt, wurden bei diesen Berechnungen wegen ihres geringen Anteils am gesamten Wärmebedarf in der betrachteten Siedlung vernachlässigt.

Tabelle 5.4 Verbraucherstruktur im Niederspannungsnetz

Klasse	Gebäudetyp	Anzahl
III	1 Wohneinheit	78
IV	2 - 3 Wohneinheiten	39
V	4 - 7 Wohneinheiten	8
VI	8 - 15 Wohneinheiten	3
Gewerbeeinheiten		8

Zunächst wurde eine statische Lastflussrechnung durchgeführt. Hierfür wurde eine elektrische Durchschnittsleistung von 400 W pro Haushalt angesetzt, die sich aus den Daten des Hessischen Statistischen Landesamtes [12] für das Jahr 2001 ergibt. Entsprechend der Klassifizierung des jeweils versorgten Wohngebäudes werden KWK-DEA mit thermischen und elektrischen Bemessungsleistungen gemäß Tabelle 4.6 in jedem Wohngebäude angenommen.

Ziel der Lastflussrechnung ist die Überprüfung des Spannungsbandes der einzelnen Netzknoten und der Auslastung der einzelnen Netzelemente. Die Berechnungen erfolgten für folgende Szenarien:

- ein Referenzszenario ohne dezentrale Einspeisung
- ein worst-case-Szenario mit Lastabnahme und maximaler Einspeisung
- ein Vergleichszenario ausschließlich mit maximaler Einspeisung ohne Lasten

Eine Übersicht über die aufgetretenen Maximalwerte ist in Tabelle 5.5 angegeben. Es ist festzustellen, dass selbst im Extremfall, in dem die komplette Einspeiseleistung in die überlagerte Mittelspannungsebene abgeführt wird, zwar eine (etwa um den Faktor 4) angestiegene Auslastung, jedoch keine Überlastung der Betriebsmittel auftritt. Auch die maximale Spannungsabweichung von rund 4% liegt im Rahmen des in der DIN IEC 60038 [15] und DIN EN 50160 [16] genannten Toleranzbandes. Dies gilt sowohl für die noch gültigen Werte +6/-10% als auch für die künftigen Toleranzen $\pm 10\%$. Folglich ist der Schluss zu ziehen, dass eine flächendeckende Durchdringung von KWK-DEA für die Belastung des betrachteten Niederspannungsnetzes hinsichtlich Betriebsmittelauslastung und Spannungshaltung selbst unter den angenommenen worst-case-Bedingungen als unkritisch anzusehen ist.

Tabelle 5.5: Maximalergebnisse der statischen Lastflussrechnung

	Referenz ohne DEA	Lasten und DEA	Ohne Netzlast
Spannungsabweichung [%]	-1,38	2,79	4,07
Auslastung ONT [%]	16,1	50,6	64,9
Leitungsauslastung [%]	17,6	46,5	61,3
Wirkleistungsbezug [kW]	94	-317	-409

Zu berücksichtigen ist dagegen die massive Rückspeisung in die Mittelspannungsebene. Um diese Rückspeisesituation besser beurteilen zu können, ist in einem zweiten Schritt eine Lastflussrechnung mit den unter Abschnitt 5.1 vorgestellten thermischen und elektrischen Lastgängen an den entsprechenden Referenztagen durchgeführt worden.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in den folgenden Bildern angegeben. Bild 5.16 zeigt den Verlauf der Einspeisung für einen Winter-Werk- und –Sonntag. Es ist zu bemerken, dass die Variationen des Lastgangs im Wesentlichen durch die elektrische Last bestimmt werden. Aufgrund des hohen Heizwärmebedarfs fahren die KWK-DEA in dieser Jahreszeit konstante Vollast, was lediglich zu einem (negativen) Offset des elektrischen Lastgangs führt. Da, wie oben ausgeführt, im untersuchten Netz durch die Rückspeisungen keine Betriebsmittel-Überlastungen auftreten, besteht diesbezüglich kein Handlungsbedarf. Die in dieser Jahreszeit auftretenden Einspeiseschwankungen sind in Form von Lastschwankungen bereits heute vorhanden.

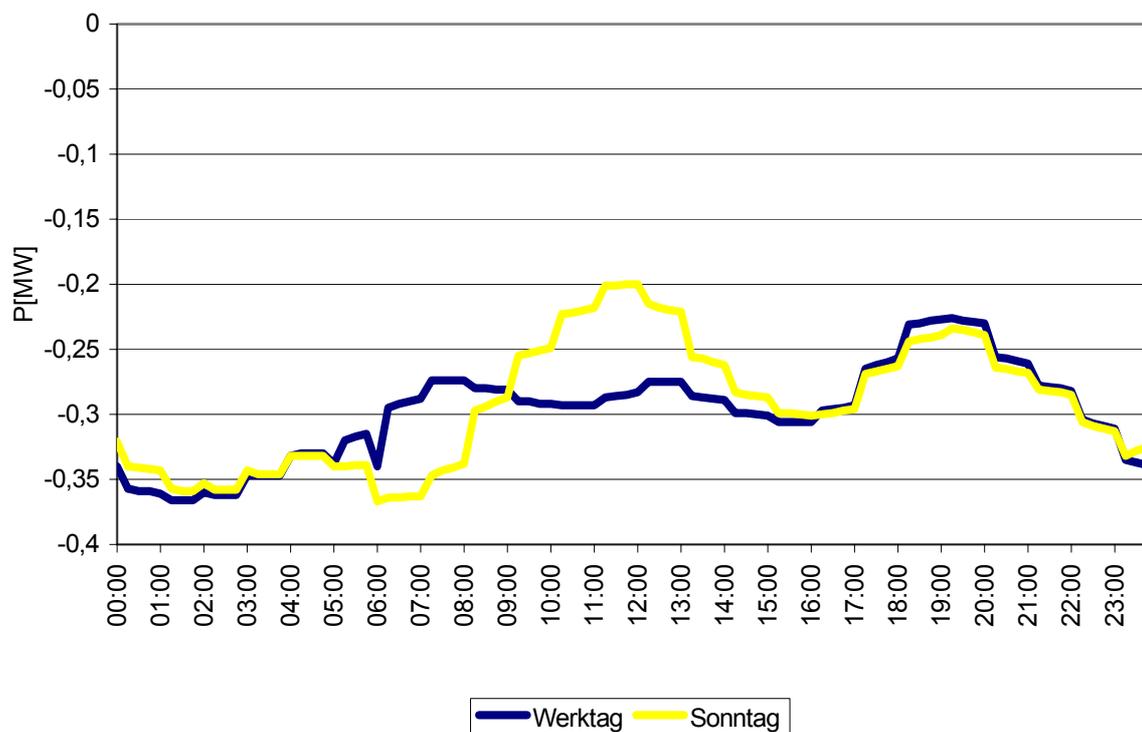


Bild 5.16: Leistungsbilanz des Niederspannungsnetzes im Winter

Im Gegensatz dazu steht der Verlauf der Einspeisesituation im Sommer, wenn der Wärmebedarf fast ausschließlich durch den Warmwasserbedarf bestimmt wird (s. Bild 5.17). Hier wird der tägliche Warmwasserbedarf aufgrund ausreichender Speicherkapazitäten gebündelt innerhalb einer Stunde gedeckt. In dieser Zeit arbeiten die KWK-DEA mit Vollast. Die Einschaltung der einzelnen Anlagen erfolgt zufällig über den Tag verteilt. Dabei ist zu erwarten, dass sich die einzelnen Zuschaltungen zu den Zeiten des erhöhten Warmwasserbedarfs von Haushalten, d.h. in den Morgen- und Abendstunden, häufen. Der Extremfall mit Einspeisung aller Anlagen zum gleichen Zeitpunkt ist in Bild 5.17 gezeigt. Ein solcher Leistungsverlauf ist für einen Netzbetreiber unerwünscht, weshalb in diesem Fall Maßnahmen, wie Demandside-Management auf der thermischen Seite, erfolgen sollten. Für nähere Betrachtungen hierzu sei auf Abschnitt 6 verwiesen.

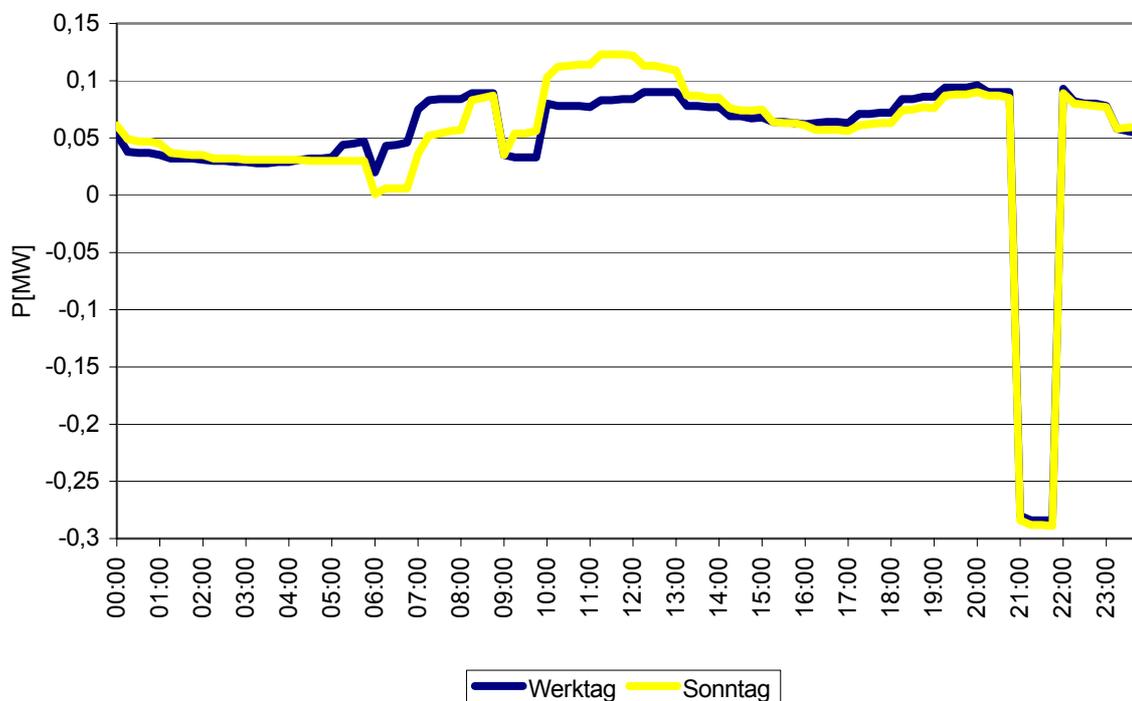


Bild 5.17: Leistungsbilanz des Niederspannungsnetzes im Sommer

Die vorangegangenen Betrachtungen zeigen, dass der flächendeckende Einsatz von KWK-DEA im wärmegeführten Betrieb trotz bzw. wegen des Einsatzes thermischer Pufferspeicher zu einer erheblichen Veränderung des Bilanzprofils führt, das den Leistungsaustausch mit der Mittelspannungsebene kennzeichnet. Darüber hinaus kommt es zu einer Leistungsrückspeisung im 100%-Szenario. Um die Konsequenzen hiervon abzuschätzen, ist eine Analyse der überlagerten Mittelspannungsebene notwendig. Zusammen mit dem Bilanzprofil in Übergangszeiten (Bild 5.18) geht eine in Einspeisung und Verbrauch differenzierte Version der hier ermittelten Lastprofile als Basis in die Lastflussrechnung der Mittelspannungsebene ein.

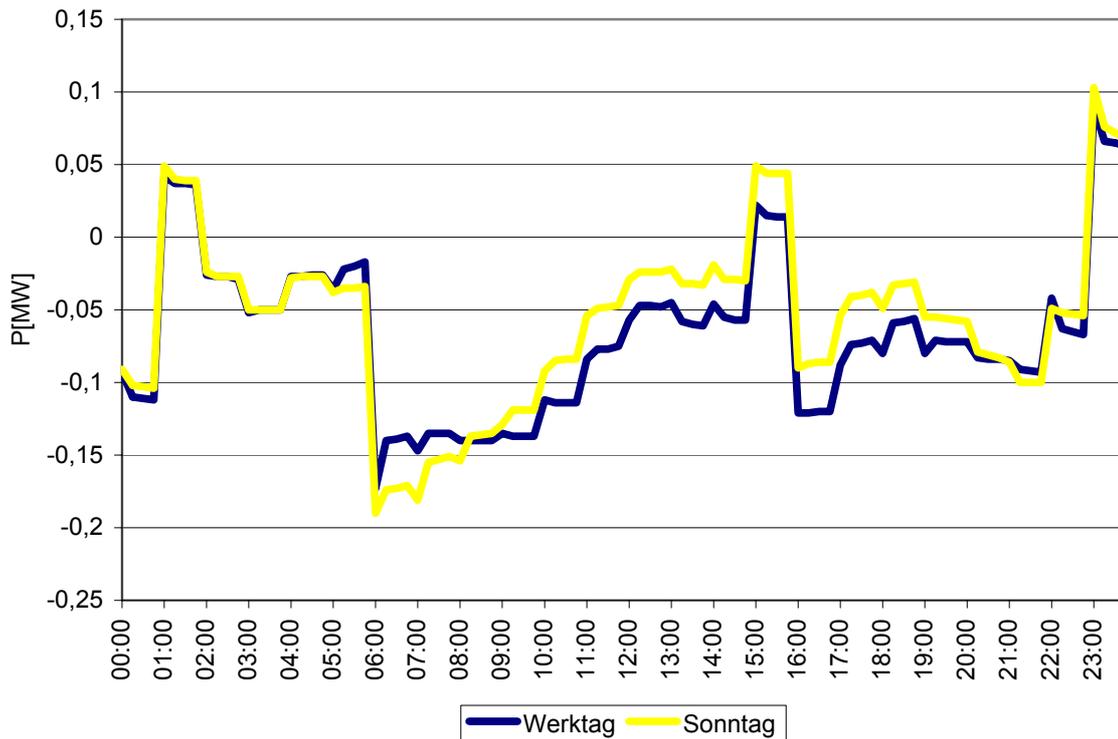


Bild 5.18: Leistungsbilanz des Niederspannungsnetzes in der Übergangszeit (Frühjahr/Herbst)

5.3 Lastflussberechnung Mittelspannungsnetz

Das in einem weiteren Schritt analysierte Mittelspannungsnetz besitzt eine Topologie gemäß Bild 5.19. Das unter Abschnitt 5.2 betrachtete Niederspannungsnetz befindet sich in den Ausläufern dieses Netzes an Station E. Durch Einsatz offener Trennstellen wird das Netz als verzweigtes Strahlennetz betrieben. Die Speisung erfolgt an der Umspannanlage A aus der 110-kV-Ebene. Der Bereich, in dem sich das untersuchte Niederspannungsnetz befindet, wird durch ein eigenes Schaltheis (Station B) gespeist, das als Hauptverteilerstation charakterisiert werden kann und über zwei Kabelstrecken versorgt wird. Gleichzeitig bildet das Schaltheis die Gegenstation zu den aus der Umspannanlage A abgehenden Versorgungsstrahlen. Ausgehend von diesem Schaltheis wird ein offener Ring gespeist, dessen Trennstelle C insgesamt als Gegenstation für die aus dem Schaltheis und der Umspannanlage ausgehenden Strahlen angesehen werden kann. Im Netz werden neben den Speisekabeln verschiedene VPE- und Papiermasse-Kabeltypen mit den Querschnitten 95 mm^2 und 150 mm^2 eingesetzt. Das Schaltheis speist einige weitere Versorgungsgebiete, die für das Forschungsvorhaben nicht relevant sind. Sie sind durch Ersatzlasten am Schaltheis indirekt modelliert worden. Die Parametrierung der Ersatzlast orientiert sich an dem von der HEAG Südthessische Energie AG zur Verfügung gestellten Referenzlastfluss.

Im Mittelspannungsnetz sind Verbraucher gemäß α angeschlossen. Aufgrund der hohen Anzahl der Niederspannungsnetze konnten diese nicht komplett modelliert werden. Stattdessen wurde, wie unter Abschnitt 5.1.4 beschrieben, nur ein Niederspannungsnetz explizit betrachtet (vgl. Abschnitt 5.2). Die Ergebnisse hieraus wurden skaliert und - differenziert in Einspeise- und Verbrauchsbilanzprofile - allen 52 Niederspannungsnetzen zugrunde gelegt. Bei Verbrauchern der Kategorie „sonstige“ handelt es sich um Einrichtungen der US-Army mit vergleichsweise geringer Bemessungsleistung. Diese sind vernachlässigt worden, da es sich zum einen um nicht verallgemeinerungsfähige Verbraucher handelt, und zum anderen eine Vernachlässigung das Ergebnis des Ausgangslastflusses nur geringfügig beeinflusst.

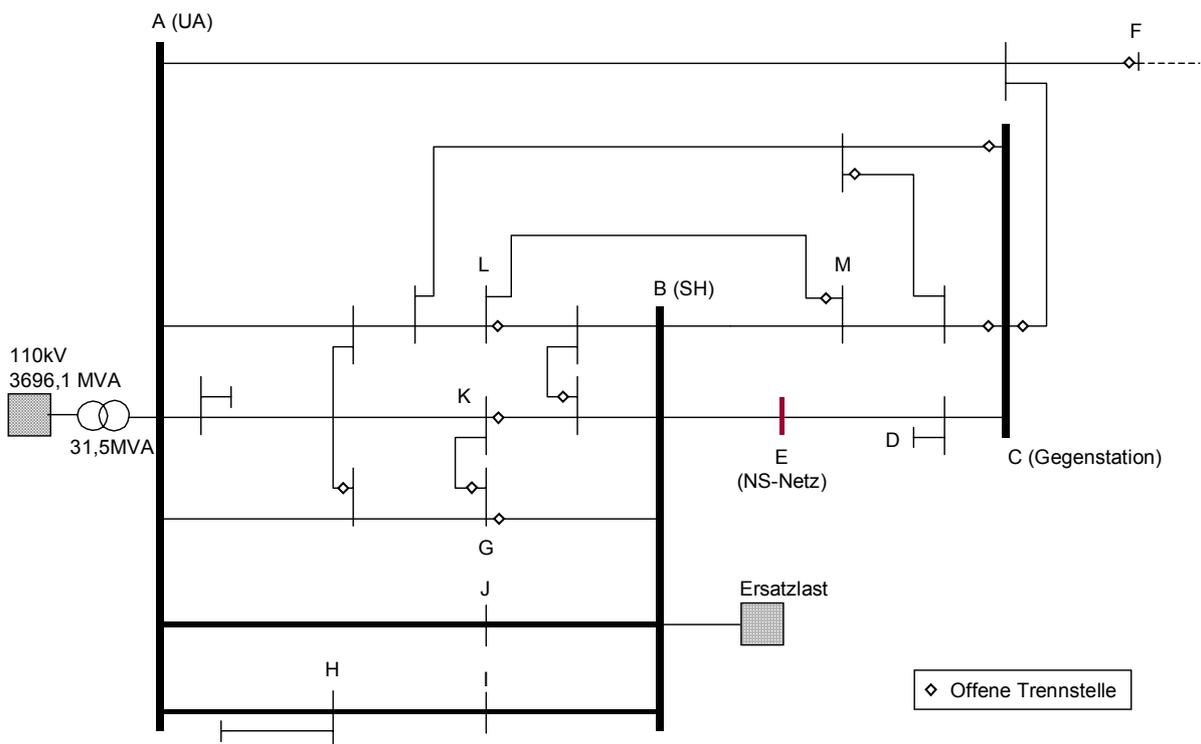


Bild 5.19: Topologie des betrachteten Mittelspannungsnetzes

Tabelle 5.6 : Verbraucherstruktur im Mittelspannungsnetz

Verbrauchertyp	Niederspannungsnetz	G1	G3	G4	sonstige	Summe
Anzahl	52	14	3	7	3	79

Gemäß Tabelle 5.7 sind Lastflussrechnungen für ein Referenzszenario ohne KWK-DEA und für ein Worst-Case-Szenario mit 100% DEA-Durchdringung unternommen worden. Im 100%-Szenario wird eine KWK-DEA parallel zu jeder Last angenommen. Entsprechend den in [11] getroffenen Abschätzungen ist zusätzlich eine realistischere Durchdringung mit einer Umsetzung von 20% des technischen Potenzials angenommen worden. In diesem Szenario sind alle Gewerbe mit einer KWK-DEA versehen worden. Bei den Wohngebieten, die in der gewählten Betrachtungsweise ausschließlich durch Niederspannungsnetze repräsentiert werden, ist das zuvor benutzte Einspeiseprofil der DEA auf 20% des Wertes skaliert worden.

Tabelle 5.7 : *Betrachtete Szenarien*

Szenario		Referenz	20%	100%
Durchsatz [%]	Haushalte	0	20	100
	Gewerbe	0	100	100

Vom statischen Lastfluss sind Ergebnisse mit vergleichbaren Kernaussagen wie im Niederspannungsbereich zu erwarten (vgl. Abschnitt 5.2). Deshalb ist ein statischer Lastfluss nur zur Verifizierung der Implementierung des Netzes in die Lastfluss-Berechnungsprogramme CALPOS® und INTEGRAL® anhand der von der HEAG Süd Hessische Energie AG zur Verfügung gestellten Lastflussrechnung erfolgt. Zur Bewertung der Einspeisungen der KWK-DEA wurde direkt eine Profillastflussberechnung durchgeführt. Da diese aus einer Sequenz verschiedener statischer Lastflussrechnungen mit variablen Eingangsdatensätzen besteht, wird der Standardfall des statischen Lastflusses mit Normleistungen ebenfalls abgedeckt.

Die Maximalergebnisse der Lastflussrechnung können Tabelle 5.8 entnommen werden. Die hier angegebenen Extremwerte sind als Worst-Case-Wert zu verstehen, da für alle Lasten und Einspeisungen dasselbe Profil mit Gleichzeitigkeitsfaktor 1 verwendet worden ist. Wie zu erkennen ist, tritt lediglich im 100%-Szenario eine Spannungserhöhung um maximal 3% auf. Diese liegt im Rahmen der maßgeblichen Normen IEC60038 [15] und DIN EN 50160 [16] und kann somit toleriert werden.

Bezüglich der Elementauslastungen ist auffällig, dass diese an Sonntagen stärker ausgeprägt sind als an Werktagen. Die Begründung hierfür liegt darin, dass sich im betrachteten Netzgebiet ein Großteil der Verbraucher aus Wohneinheiten zusammensetzt (Tabelle 5.6). Aufgrund von gleichen Verhaltensmustern führt dies dazu, dass vor allem die Extremwerte wie z.B. die „Kochspitze“ mit einem relativ hohem Gleichzeitigkeitsfaktor auftreten. Dies bedingt die im Vergleich zum Werktag stärker ausgeprägten Maximalwerte. Die Tatsache, dass sich die Werte für Sonn- und Werktage an Wintertagen im 100%-Szenario gleichen liegt darin begründet, dass dann die starke Netzauslastung durch die Rückspeiseströme der KWK-DEA in die 110-kV-Ebene resultiert (s. u.).

Tabelle 5.8: Maximalergebnisse der Lastflussrechnungen in der Mittelspannungsebene

a) 100% DEA-Durchdringung

		Durchsatz 100%					
		Sommer		Übergang		Winter	
		Sonntag	Werktag	Sonntag	Werktag	Sonntag	Werktag
Maximale Spannung	[kV]	20,40	20,39	20,28	20,24	20,60	20,60
	[%]	102	102	101	101	103	103
	Knoten	Station D	Station D	Station D	Station D	Station D	Station D
Maximale Auslastung	[%]	84%	82%	55%	50%	114%	114%
	Elem.	Leitung H-I	Leitung H-I	Leitung H-I	Leitung H-I	Leitung H-I	Leitung H-I
Max. Überlast [h]						08:45	06:00
Überlaste Elemente						Leitung H-I Leitung I-B Leitung J-B	Leitung H-I Leitung I-B Leitung J-B

b) 20% DEA-Durchdringung

		Durchsatz 20%					
		Sommer		Übergang		Winter	
		Sonntag	Werktag	Sonntag	Werktag	Sonntag	Werktag
Maximale Spannung	[kV]	20,00	20,00	20,00	20,00	20,06	20,06
	[%]	100	100	100	100	100	100
	Knoten	Station F	verschieden	verschieden	Station F	Station D	Station D
Maximale Auslastung	[%]	49%	42%	48%	41%	55%	46%
	Elem.	Leitung H-I	Leitung H-I	Leitung H-I	Leitung H-I	Leitung H-I	Leitung H-I
Max. Überlast [h]							
Überlaste Elemente							

c) Referenzszenario

		Referenz					
		Sommer		Übergang		Winter	
		Sonntag	Werktag	Sonntag	Werktag	Sonntag	Werktag
Maximale Spannung	[kV]	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
	[%]	100	100	100	100	100	100
	Knoten	verschieden	verschieden	Station F	Station F	verschieden	verschieden
Maximale Auslastung	[%]	49%	42%	59%	53%	80%	70%
	Elem.	Leitung H-I					
Max. Überlast [h]							
Überlaste Elemente							

In diesem Szenario tritt eine Überlastung von drei Leitungen um maximal 14% auf, die aufgrund ihrer langen Dauer von rund 9 Stunden jenseits der zulässigen Belastbarkeit der Betriebsmittel liegt und nicht toleriert werden kann. Eine genaue Analyse zeigt, dass es sich bei den überlasteten Elementen ausschließlich um Leitungssegmente aus Papier-Masse-Kabeln der beiden in Bild 5.19 fett gekennzeichneten Speisekabel zur Hauptverteilstation B handelt. Die maximale Auslastung der VPE-Segmente liegt bei rund 97%. Diesem Problem kann durch drei Maßnahmen Abhilfe geschaffen werden:

1. Ausbau der bestehenden Verbindung

Diese Variante erfordert relativ hohe Investitionen, bietet aber die Vorteile einer vergleichsweise einfachen und übersichtlichen Netzbetriebsführung und -planung. Hinzu kommt, dass es die einzige Möglichkeit ist, auch wintertags im 100%-Szenario eine (n-1)-Sicherheit zu gewährleisten (siehe auch Abschnitt 7). Bedingt durch den langen Betrachtungszeitraum und die relativ geringe Wahrscheinlichkeit des Eintretens des 100%-Szenarios (volle Umsetzung des technischen Potenzials) ist ein adäquater Investitionszeitpunkt kaum zu nennen. Den Einschätzungen von [11] folgend liegt dieser sicherlich jenseits des Betrachtungszeitraums dieser Studie.

2. Abwarten der Standard-Erneuerungen

Es kann erwartet werden, dass Papier-Masse-Kabel ohnehin im Rahmen der Netzausbau- und Instandhaltungsmaßnahmen innerhalb der nächsten 20 Jahre durch leistungsstärkere Kabeltypen ersetzt werden. Somit kann angenommen werden, dass bei einem realen Erreichen des 100%-Szenarios nur Kabeltypen vorhanden sind, die mindestens die Leistungsfähigkeit von VPE-Kabeln besitzen. In diesem Fall wären keine zusätzlichen Maßnahmen zum Austausch notwendig. Nachteilig ist hier die sehr schlechte planerische Vorhersagbarkeit.

3. Umschaltmaßnahmen

Durch Schließen der derzeit offenen Trennstelle zwischen der Umspannanlage und dem Schalthaus auf dem Leitungszug A-G-B in Bild 5.19 lässt sich die maximale Auslastung auf rund 87% reduzieren. Vorteil dieser Maßnahme ist ihre Kostenneutralität. Nachteilig ist, dass nun die betreffende Leitung nicht mehr exklusiv den Kategorien „Verteilung“ oder „Übertragung“ zugeordnet werden kann. Folglich werden die Planungs- und Betriebsführungsaufgaben komplexer.

Die beiden anderen direkten Verbindungsleitungen kommen nicht in Betracht, da ein Schließen der Trennstellen hier zwar die vorher überlasteten Elemente ausreichend entlasten, jedoch nun Kabel auf der neuen Verbindung überlasten würden.

Eine Betrachtung der maximalen Netzauslastung über das ganze Jahr zeigt, dass die Auslastung in einem 100%-Szenario steigt und ggf. ein Ausbau unternommen werden muss (vgl. Bild 5.20). Hingegen zeigt sich im 20%-Szenario eine Reduktion der Netzauslastung von 80 auf rund 60%. Dies ist relevant für die Netzausbauplanung, da bei Eintreten dieses Szenarios in Netzbereichen, in denen ein Zuwachs der installierten Leistung prognostiziert wird, ein Ausbau verzögert oder vermieden werden kann.

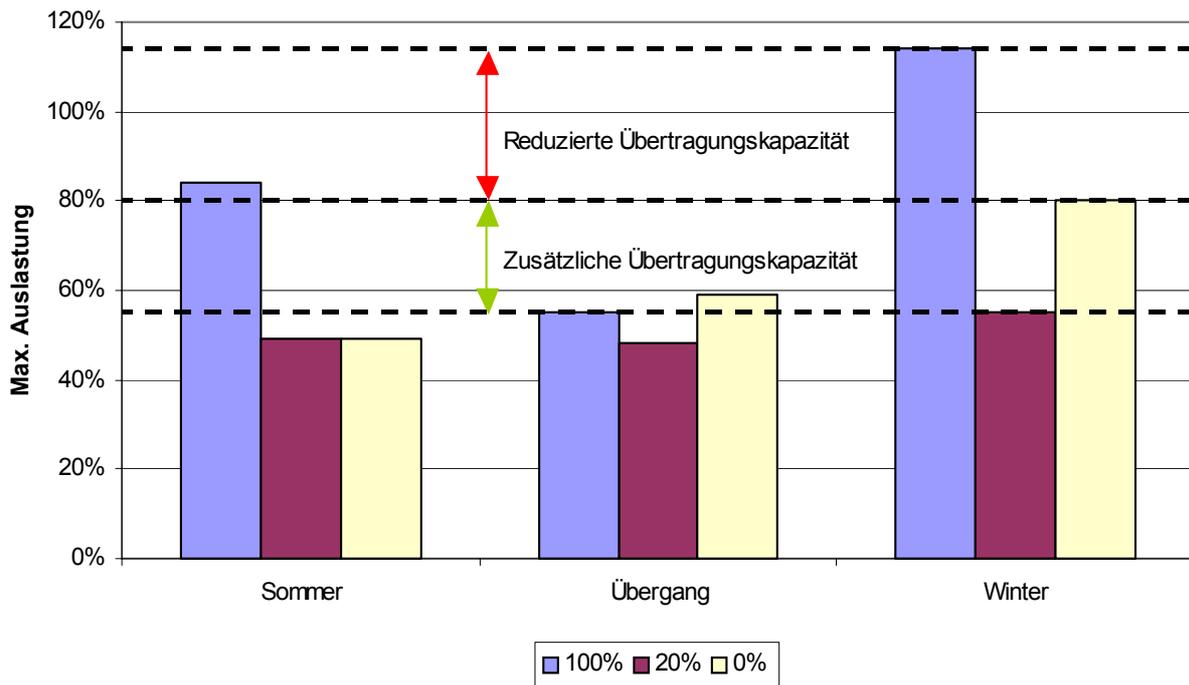


Bild 5.20: Elementauslastung in den verschiedenen Szenarien (sonntags)

Wichtig für Planung und Betrieb der überlagerten 110-kV-Ebene ist die Leistungsbilanz im Mittelspannungsnetz. Die resultierenden Bilanzprofile sind in Bild 5.21 bis Bild 5.23 exemplarisch für Sonntage angegeben. Die Bilanzprofile ähneln in ihrem Verlauf den unter Abschnitt 5.2 vorgestellten Profilen, was die Dominanz der Wohngebäude in dem betrachteten Netzausschnitt belegt.

Auch wenn die thermische Leistung aller KWK-DEA durch die Berücksichtigung von ökonomischeren Spitzenlastkesseln und Pufferspeichern beschränkt wird, zeigt ein Vergleich der Diagramme, dass die Stromaustauschbilanzen mit dem Hochspannungsnetz abhängig von der Jahreszeit erhebliche Unterschiede aufweisen. Während sich im Winter durch die Band-Volllast der Anlagen lediglich eine negative Verschiebung der Profilamplituden einstellt, kann im Sommer eine Rückspeisespitze beobachtet werden, die auftritt, wenn alle KWK-DEA gleichzeitig ihre Pufferspeicher aufladen. Diese Spitze ist eine Worst-Case-Betrachtung da sich aufgrund von stochastischen Effekten ein Gleichzeitigkeitsfaktor kleiner eins einstellen wird. Dennoch gilt es einen solchen Effekt insbesondere im 100%-Szenario unbedingt zu vermeiden, da er die Kraftwerkseinsatzplanung erschwert und die Bereitstellung von relativ hoher Übertragungskapazität für nur eine Stunde erfordert. Dies kann durch den Einsatz eines geeigneten einfachen Koordinierungssystems vermieden werden, durch das im Idealfall auch zur Sommerzeit nahezu Bandlast generiert werden kann. Im betrachteten Netz liegt diese in erster Näherung bei rund 1,5 MW. Im Fall des 20%-Szenario tritt durch die Ladung der Pufferspeicher maximal ein Lastrückgang um rund 66% auf, was ebenfalls nicht akzeptabel ist und ebenfalls den Einsatz eines Energiemanagementsystems sinnvoll werden lassen kann.

Im Übergangszeitraum tritt eine starke Verfremdung des Referenzprofils im 100%-Szenario auf, während im 20%-Szenario noch in grober Näherung von einer Absenkung gesprochen werden kann. Da mehrere Maxima und Minima im Tagesverlauf vorliegen, kann durch Aufladesteuerung der Pufferspeicher mit Hilfe eines geeigneten Managementsystem auch hier näherungsweise Bandlast erzeugt werden. Alternativ kann ein periodisches Einspeiseverhalten mit in bestimmten Grenzen frei wählbarem periodischem Verlauf erzeugt werden, was besonders in dieser Jahreszeit den Einsatz von DEA für Systemdienstleistungen nahe legt (siehe auch Abschnitt 6).

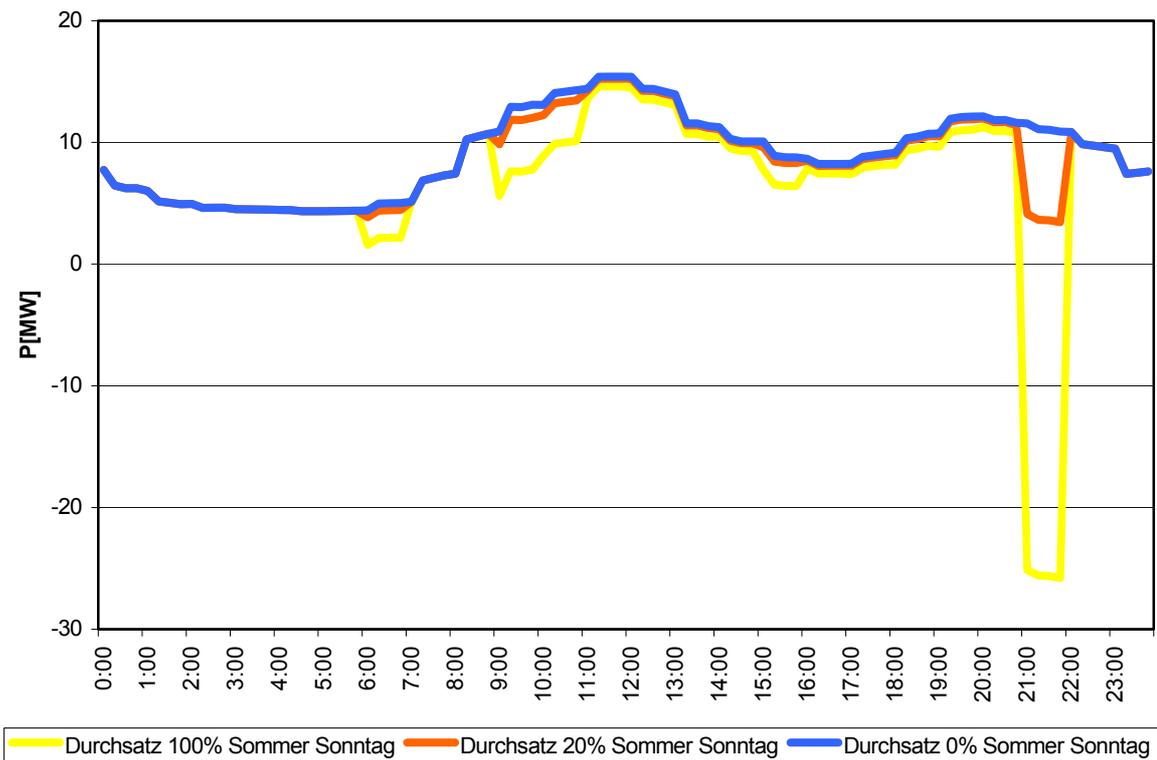


Bild 5.21: Bilanzprofil im Sommer

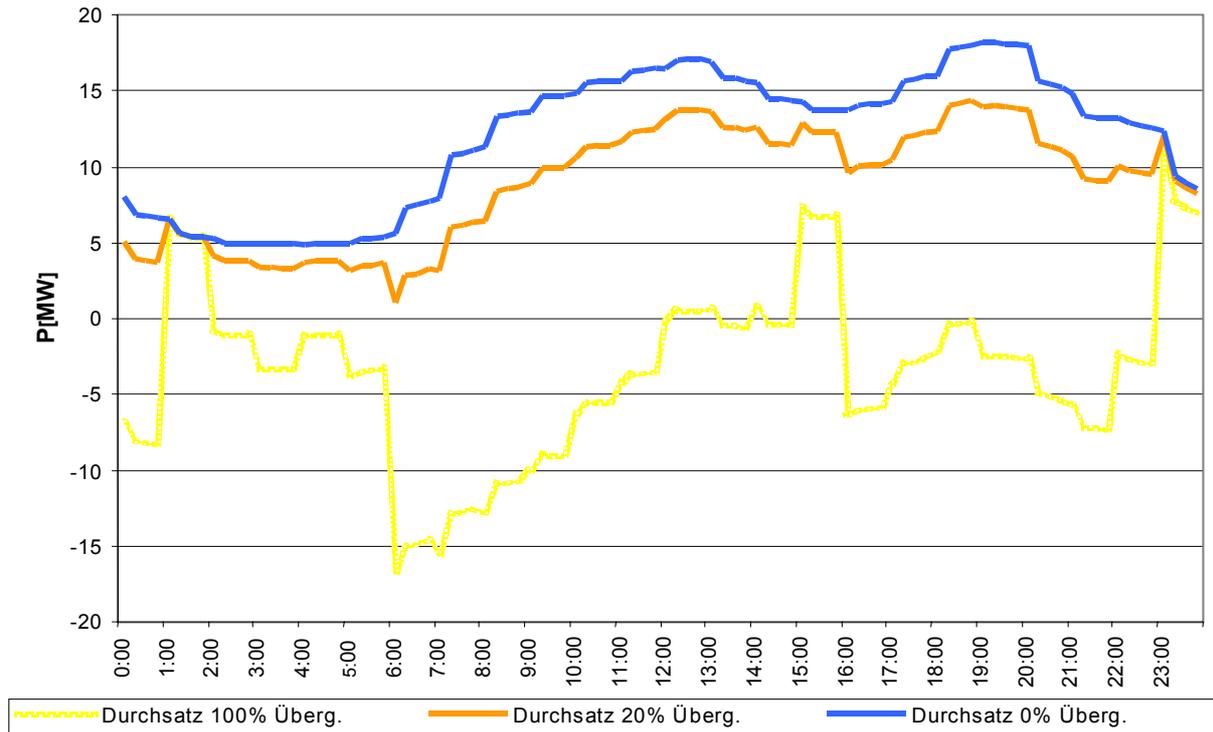


Bild 5.22: Bilanzprofil im Übergang (Frühjahr/Herbst)

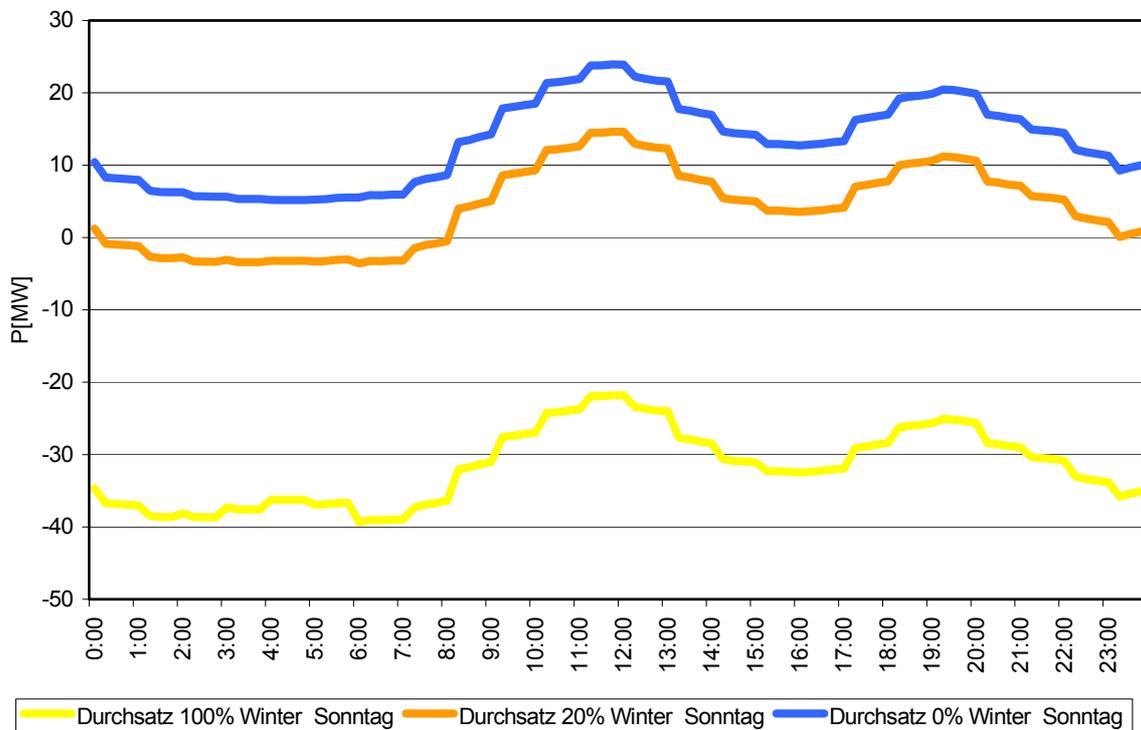


Bild 5.23: Bilanzprofil im Winter

6 Ausgleichsenergie-Potenzial

6.1 Jahreszeitliche Unterschiede

Wie schon im Abschnitt 5 ausführlich erläutert, unterliegt der Wärmebedarf, insbesondere in Wohn- und Bürogebäuden, erheblichen jahreszeitlichen Schwankungen, siehe z. B. Bild 5.5 für das definierte Referenz-Einfamilienhaus. Daran ändert auch der Einsatz gängiger thermischer Pufferspeicher nichts, die zwar die im Tagesverlauf auftretenden Bedarfsschwankungen glätten und somit die äquivalente Nutzungsdauer einer KWK-DEA erhöhen können, nicht jedoch jahreszeitliche Bedarfsschwankungen auszugleichen vermögen, vgl. Bild 5.6 bis Bild 5.8.

Aufgrund des gleichen Bemessungsverfahrens für die KWK-DEA der verschiedenen definierten Gebäudeklassen (Referenzgebäude) im für die durchgeführten Simulationsrechnungen benutzten Modell ergeben sich auch prinzipiell ähnliche Betriebsweisen bei allen Referenzgebäuden, unabhängig von der Größe der eingesetzten Anlagen. Bild 6.1 zeigt beispielhaft die jahreszeitlich variierende Betriebsweise der KWK-DEA für das Referenz-Einfamilienhaus.

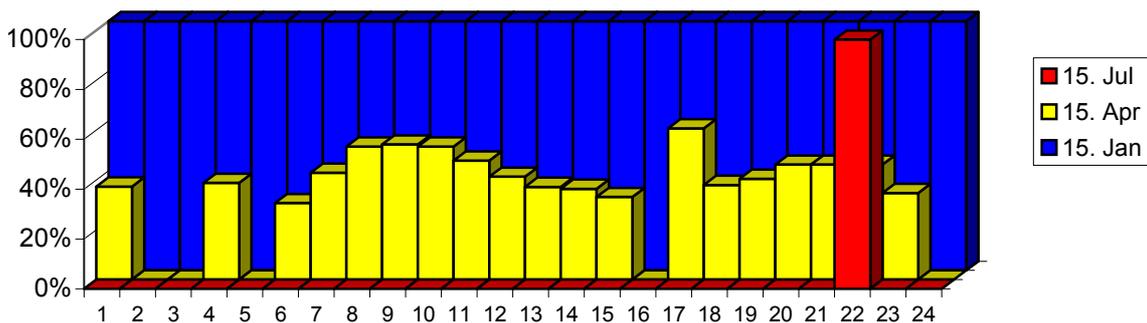


Bild 6.1: Jahreszeitliche Abhängigkeit der in das Verteilnetz eingespeisten Leistung (bezogen auf die elektrische Bemessungsleistung) einer KWK-DEA; Betrieb mit Pufferspeicher, Beispiel Referenz-Einfamilienhaus

Für das Regelpotenzial der KWK-DEA, mit welchem z.B. Ausgleichsenergie zur Verfügung gestellt werden kann, können daher die folgenden, für die betrachteten Jahreszeiten einheitlichen Aussagen getroffen werden:

Im Winter werden nahezu alle Module 24 Stunden täglich bei Volllast betrieben, siehe auch Bild 6.1. Abhängig von der Dimensionierung der Pufferspeicher ergibt sich allenfalls in den Nachtstunden bei einigen der KWK-DEA eine geringe Reduzierung der Leistungsabgabe. Wegen des somit geringen Spielraums zur Regelung der Leistungsabgabe ist eine Nutzung der KWK-DEA zur Verfügungstellung von Ausgleichsenergie im Winter praktisch nicht gegeben, wenn man nicht eigens für diesen Zweck größere Anlagen-größen wählt oder die Nutzung der KWK-DEA zur Heizenergiebereitstellung einschränkt.

Beide Wege sind bei auch in Zukunft vermutlich hohen spezifischen Anlagenkosten ökonomisch wenig sinnvoll.

Im Sommer ist der Wärmebedarf der Wohngebäude wie auch von Bürogebäuden, Schulen etc. etwa auf eine (siehe Referenz-Einfamilienhaus, Bild 6.1) bis 1,5 Stunden Volllast der jeweiligen KWK-DEA beschränkt. Da aus ökonomischen Gründen ein Betrieb über den thermischen Bedarf hinaus nicht sinnvoll ist und eine Speicherung der Wärme wegen der Verluste eines Pufferspeichers zeitlich begrenzt ist, ist das Potenzial an wirtschaftlicher Regelleistungsdarbietung auf etwa 1,5 Volllaststunden je KWK-DEA täglich begrenzt. Etwas höher ist der Wärmebedarf von solchen Einrichtungen, die einen größeren thermischen Grundbedarf unabhängig von der Jahreszeit aufweisen, wie z.B. Schwimmbäder. Hier liegt die durchschnittliche Nutzungsdauer der Höchstlast der Klein-BHKW im Sommer bei den gewählten Modellparametern noch bei rund 7,5 Stunden täglich.

Wesentlich anders präsentiert sich die Situation in der Übergangszeit. Hier liegt bei allen Gebäudetypen außer jenen der Klasse I (Schwimmbäder) die tägliche Benutzungsdauer der Höchstlast des Klein-BHKW zwischen 6 und 12 Stunden, bei Schwimmbädern ist der genannte Wert höher und erreicht bis zu 18 Stunden. Somit wird vornehmlich in der Übergangszeit ein Potenzial für ein Lastmanagement in wirtschaftlichem Umfang gegeben sein.

6.2 Niederspannungsnetz

Die Potenziale zur Leistungsregelung der im Modell gewählten KWK-DEA sollen abhängig von der Jahreszeit am Beispiel des im Abschnitt 5.2 untersuchten Niederspannungsnetzes verdeutlicht werden. Hierfür soll angenommen werden, dass im betrachteten Netzgebiet 20% des technischen Potenzials für solche Anlagen realisiert worden sei. Ferner wird angenommen, dass der Strom- und Wärmelastgang der betrachteten Siedlung prinzipiell bekannt, d.h. prognostizierbar sei und angestrebt werde, durch Regelung der Leistung der KWK-DEA für eine Begrenzung der Leistungsabnahme vom überlagerten Mittelspannungsnetz zu sorgen. Weiterhin sei angestrebt, so viel des täglichen Heizenergiebedarfs wie möglich mit den installierten KWK-DEA zu erzeugen. Elektrische Verluste im Netz bleiben bei dieser Betrachtung unberücksichtigt.

Aufbauend auf den oben genannten Annahmen sind von 128 technisch möglichen Anlagen im betrachteten Niederspannungs-Netzgebiet 26 KWK-DEA verwirklicht mit einer elektrischen Summenleistung von 85,1 kW. Tabelle 6.1 gibt die Ergebnisse des verwendeten Modells für die von diesen Anlagen erzeugte elektrische Energie wieder und verdeutlicht den geringen Umfang des Regelpotenzials im Winter und im Sommer. Wegen des einheitlich hohen Wärmebedarfs der hier betrachteten Wohngebäude im Winter erreichen die KWK-DEA zu dieser Jahreszeit eine äquivalente Nutzungsdauer von 23,78 Stunden pro Tag. Das Regelpotenzial beschränkt sich auf eine gesteuerte Absenkung der erzeugten elektrischen Energie im Umfang von 0,22 Volllaststunden pro Tag; das sind lediglich 20 kWh.

In der Übergangszeit ist die Nutzungsdauer auf 5,95 äquivalenten Volllaststunden pro Tag verringert. Die erzeugte Energie in Höhe von 506 kWh kann unter Nutzung der thermischen Pufferspeicher zu beliebigen Tageszeiten in das Netz eingespeist werden, ohne dass sich Einschränkungen bei der Wärmeversorgung ergeben. Natürlich ist die maximale abrufbare Leistung auf die installierte Summenleistung von 85,1 kW begrenzt.

Im Sommer wiederum verringert sich die Nutzung der KWK-DEA und somit auch das Regelpotenzial auf einen Betrag von weniger als einer äquivalenten Volllaststunde (72 kWh). Ähnlich wie im Winter werden die Voraussetzungen für eine wirtschaftliche Steuerung der Anlagen bei im Durchschnitt weniger als drei abrufbaren kWh pro Anlage und Tag mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht gegeben sein.

Tabelle 6.1 Jahreszeitliche Regelpotenziale der KWK-DEA pro Tag im Niederspannungsnetz

Jahreszeit	Durch KWK-DEA erzeugte elektr. Energie	Äquivalente Nutzungsdauer der Volllast der KWK-DEA	Verfügbares Regelpotenzial	
			Äqiv. Nutzungsdauer d. Volllast	Energie
Wintertag	2.022 kWh	23,78 h/d	0,22 h/d	20 kWh
Übergangstag	506 kWh	5,95 h/d	5,95 h/d	506 kWh
Sommertag	72 kWh	0,85 h/d	0,85 h/d	72 kWh

Bild 6.2 bis Bild 6.4 verdeutlichen den beschriebenen Sachverhalt anhand der resultierenden Lastgänge im untersuchten Niederspannungsnetz unter Berücksichtigung der Einspeisung elektrischer Leistung aus den KWK-DEA. Die resultierenden Lastgänge in den Teilbildern a) sind jeweils als Folge eines wärmegeführten Betriebs, die resultierenden Lastgänge in den Teilbildern b) als Folge eines zentral lastgesteuerten Betriebs errechnet, wobei die gesamte aus KWK-DEA am jeweiligen Tag eingespeiste Energie nicht verändert wurde.

Für den Wintertag (Bild 6.2) ist sehr gut zu erkennen, dass die zentrale Regelung mit dem Ziel einer Lastbegrenzung praktisch ohne Wirkung bleibt, da das Regelpotenzial wie oben erläutert hier sehr gering ist (20 kWh). Es erlaubt eine geringe Absenkung der Einspeisung in den Nachtstunden zwischen 1:00 Uhr und 5:00 um bis zu maximal 6,5 kW, wodurch die ins überlagerte Mittelspannungsnetz zurückgespeiste Leistung in dieser Zeit auf 38 MW begrenzt werden kann (ungeregelt: maximal 42,5 kW Rückspeisung).

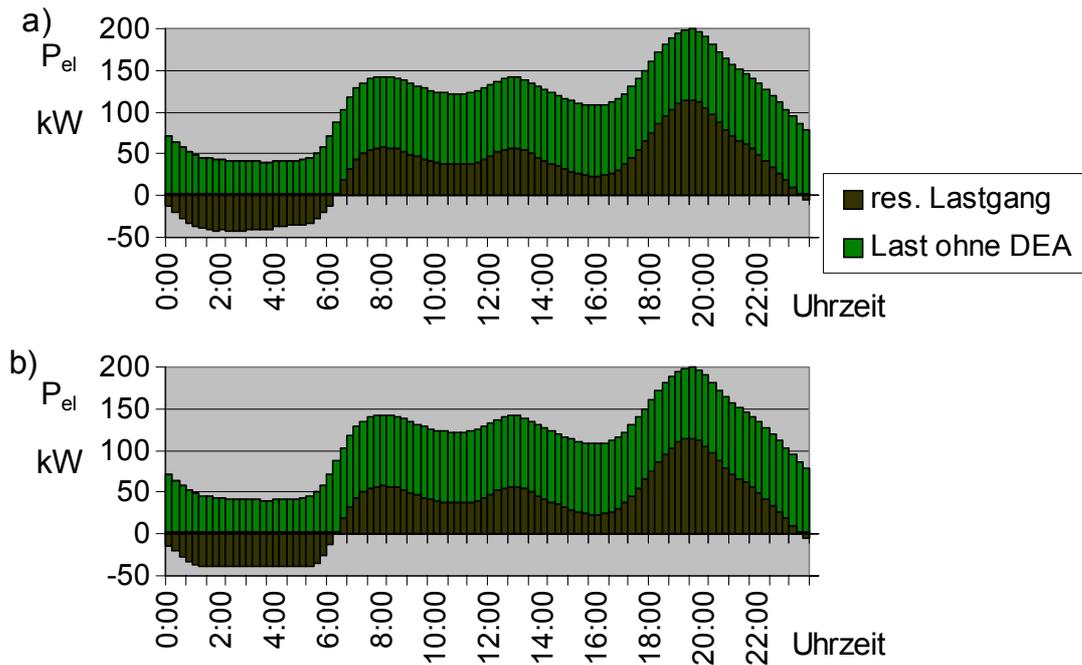


Bild 6.2 Lastgang des untersuchten Niederspannungsnetzes ohne Einspeisung und
 a) mit wärmegesteuerter
 b) mit zentral lastgesteuerter Einspeisung der KWK-DEA
 (20% des techn. Potenzials) an einem Wintertag (15. Januar)

Aus Bild 6.3 geht hervor, dass das Regelpotenzial in der Übergangszeit deutlich größer ist. Deutlich wird dies durch den veränderten resultierenden Lastgang bei zentraler Steuerung der KWK-DEA. Die zentrale Steuerung erlaubt es beispielsweise, die maximal bezogene Leistung aus dem Mittelspannungsnetz auf 85,5 kW (gegenüber 121 kW ohne Steuerung) zu begrenzen.

Bild 6.4 hingegen zeigt wiederum, wie gering das Regelpotenzial aufgrund der geringen Laufzeiten der KWK-DEA im Sommer ist. Durch zentrale Steuerung kann die beispielsweise der maximale Leistungsbezug lediglich auf 93 kW (wärmegeführt 108,5 kW) begrenzt werden.

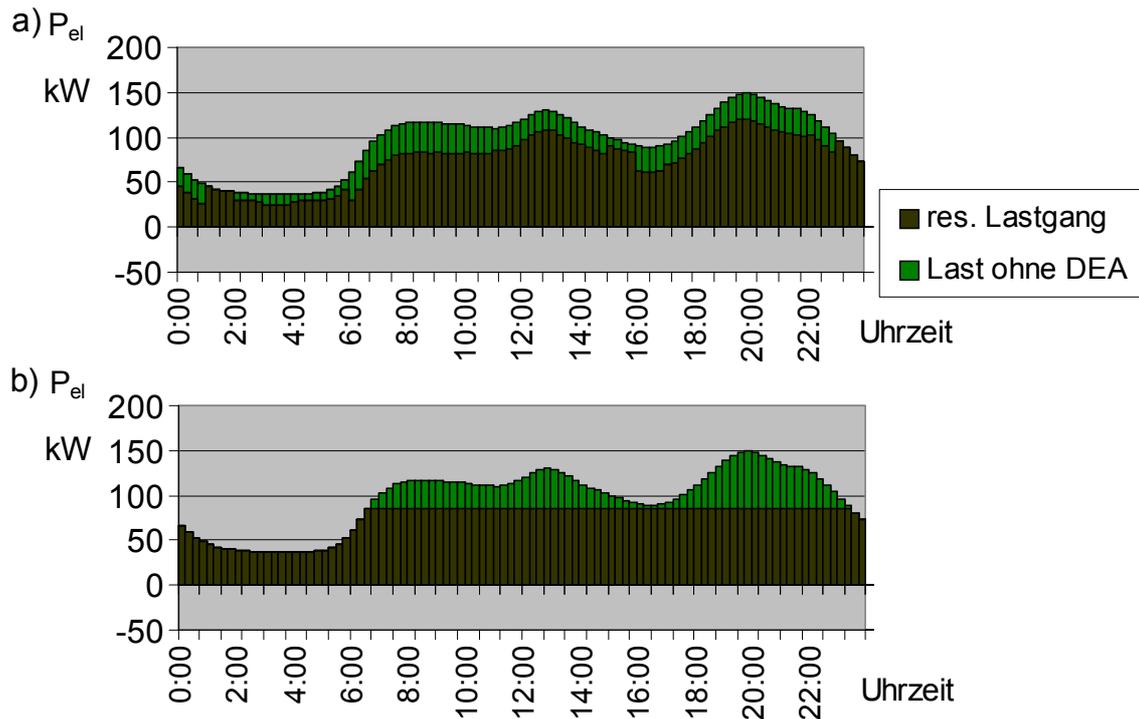


Bild 6.3 Lastgang des untersuchten Niederspannungsnetzes ohne Einspeisung und
 a) mit wärmegesteuerter
 b) mit zentral lastgesteuerter Einspeisung der KWK-DEA
 (20% des techn. Potenzials) an einem Übergangstag (15. April)

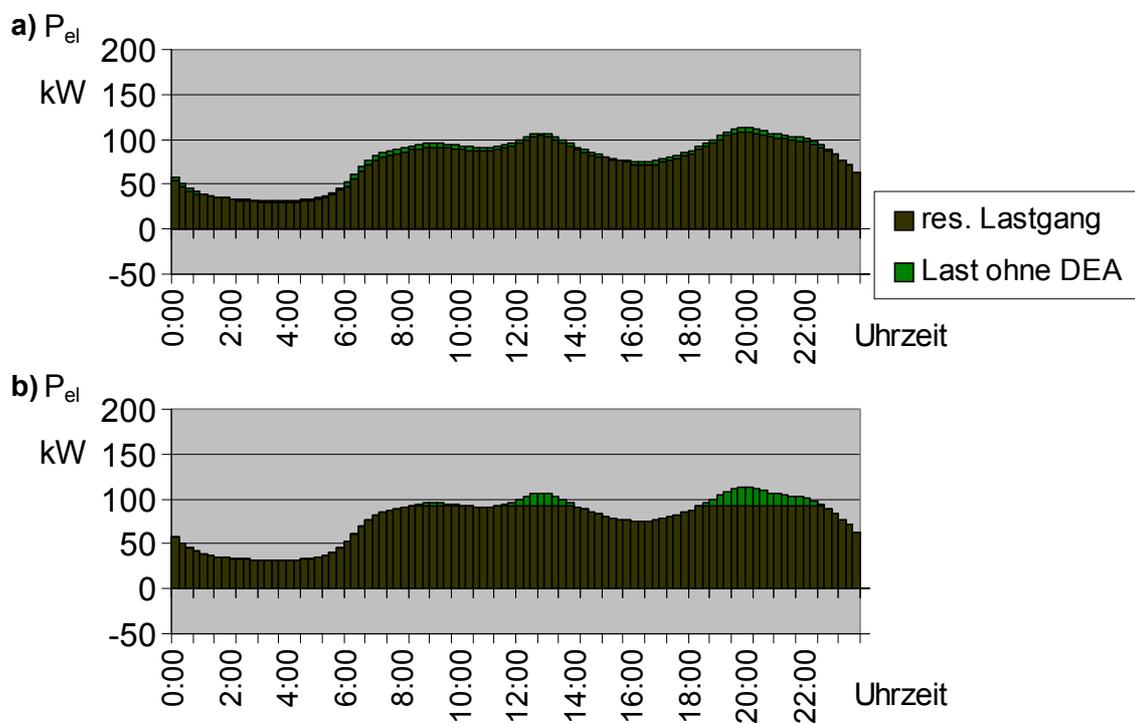
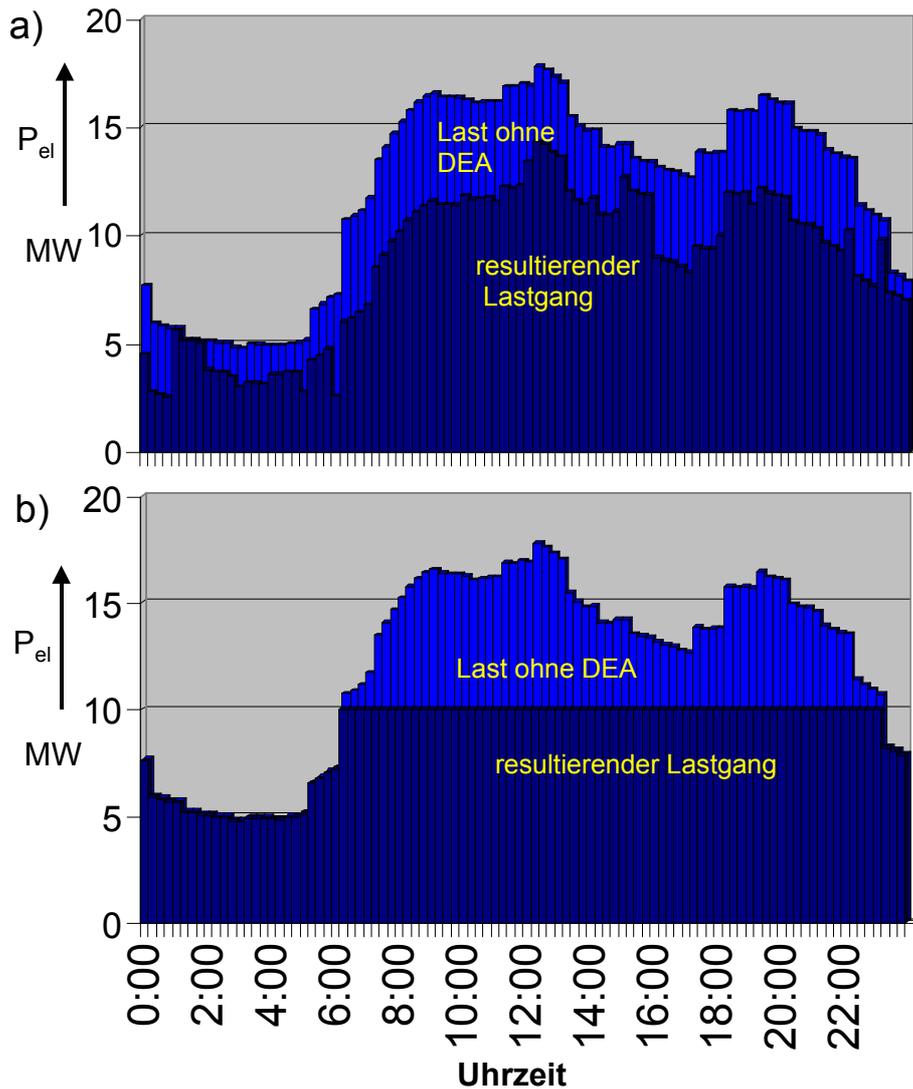


Bild 6.4 Lastgang des untersuchten Niederspannungsnetzes ohne Einspeisung und
 a) mit wärmegesteuerter
 b) mit zentral lastgesteuerter Einspeisung der KWK-DEA
 (20% des techn. Potenzials) an einem Sommertag (15. Juli)

6.3 Mittelspannungsnetz

Die im voranstehenden Abschnitt für das untersuchte Niederspannungsnetz getroffenen Aussagen lassen sich praktisch inhaltsgleich auf das Regelpotenzial für das im Abschnitt 5.3 untersuchte Mittelspannungsnetz übertragen. Auch hier ist das Regelpotenzial im Sommer wie im Winter vernachlässigbar. Eine zentrale Steuerung für ein Lastmanagement zeigt nur in der Übergangszeit eine deutliche Wirkung, siehe Bild 6.5.



*Bild 6.5 Lastgang des untersuchten Mittelspannungsnetzes ohne Einspeisung und
 a) mit wärmegesteuerter
 b) mit zentral lastgesteuerter Einspeisung der KWK-DEA
 (20% des techn. Potenzials) an einem Übergangstag (15. Juli)*

6.4 Anforderungen an die Kommunikationstechnik

Anders als zu Beginn des Projekts erwartet, zeigen die vorgestellten Ergebnisse kaum ein wirtschaftlich nutzbares Potenzial der Leistungsregelung der flächendeckend installierten KWK-DEA. Eine Regelung der Leistungsabgabe der einzelnen Anlagen kann wegen der jahreszeitlichen Einschränkungen der Nutzbarkeit auch zukünftig kaum ökonomisch betrieben werden. Soll, wie in den vorangegangenen Abschnitten angenommen, die Leistungsabgabe der KWK-DEA dennoch im Rahmen der zur Verfügung stehenden Möglichkeiten an die jeweilige regionale Last angepasst werden, erscheint eine zentrale Steuerung anhand der Lastprognose mit Vorgaben für den kommenden Tag ausreichend. Zu einer solchen Einsatzführung der KWK-DEA ist ein Kommunikationsnetz mit relativ geringen Datenübertragungsraten ausreichend.

Die Hoffnungen, mittels Power Line Communication das Stromnetz zum Datentransfer nutzen zu können, scheinen sich vorerst nicht zu verwirklichen. Die Kommunikation über GSM oder gar UMTS-Mobilfunknetze scheint aus heutiger Sicht unwirtschaftlich und wegen der geringen erforderlichen Datenübertragungsraten auch nicht erforderlich, so dass abhängig von der Notwendigkeit einer Duplex-Verbindung entweder das Telefonnetz oder Rundsteuertechnik als kostengünstigste Kommunikationstechniken am sinnvollsten erscheinen [17].

Da eine Steuerung auch kleinster Anlagen erst bei entsprechender Verbreitung wirtschaftlich wird, wird zunächst allenfalls eine Steuerung größerer KWK-DEA zur Nahwärmeversorgung bzw. zur Beheizung größerer öffentlicher Gebäude und Einrichtungen in Frage kommen. Sollte sich jedoch eine flächendeckende Anwendung von KWK-DEA auch in kleineren Wohneinheiten in ähnlichem Umfang wie in dieser Studie angenommen einstellen, wird man angesichts der sich in der Kommunikationstechnik rasch wandelnden technischen und wirtschaftlichen Parameter die Frage nach der Steuerung und der Umsetzung der hierfür erforderlichen Kommunikation zu gegebener Zeit neu stellen.

Als Alternative zum Einsatz von Kommunikationstechnik, die stets auch entsprechende Schnittstellen an den KWK-DEA voraussetzt, ist prinzipiell auch eine geeignete Tarifstruktur vorstellbar, die die Einspeisung während typischer Starklastzeiten höher vergütet und somit ebenfalls eine die Einspeisezeiten steuernde Funktion hat. Eine solche erhöhte Vergütung müsste z.B. vom Bilanzkreisverantwortlichen erstattet werden. Die Erfassung der Einspeisung muss dann mit einem Mehrtarifzähler erfolgen, die KWK-DEA müssen (ähnlichen wie bei einer zentralen Lastgangvorgabe) mit einer Einrichtung zur zeitlichen Steuerung des Betriebs versehen werden. Angesichts des ohnehin beschränkten Potenzials der (ökonomisch sinnvollen) Leistungsregelung ist die Wirksamkeit solcher tariflichen Anreize jedoch auch hier nur auf die Übergangs-Jahreszeiten beschränkt, in denen ein Spielraum für die tageszeitliche Verschiebung des Betriebs der KWK-DEA besteht.

7 Schutztechnische und vertragliche Einschränkungen des Betriebes

In diesem Kapitel werden die bei der Installation von KWK-DEA zu berücksichtigenden Normen, Richtlinien und evtl. notwendige vertragliche Bindungen aufgeführt. Daraus werden die für den Netz- und Anlagenschutz erforderlichen Schutzziele abgeleitet und Kurzschlussstromberechnungen für das Beispielnetz durchgeführt. Ein weiterer wichtiger Schwerpunkt in diesem Kapitel ist die Arbeitssicherheit; diese ist eng mit den Schutzzielen verbunden. Bild 7.1 zeigt die enge Verknüpfung der Bereiche mit den dazugehörigen Normen, Richtlinien und Empfehlungen.

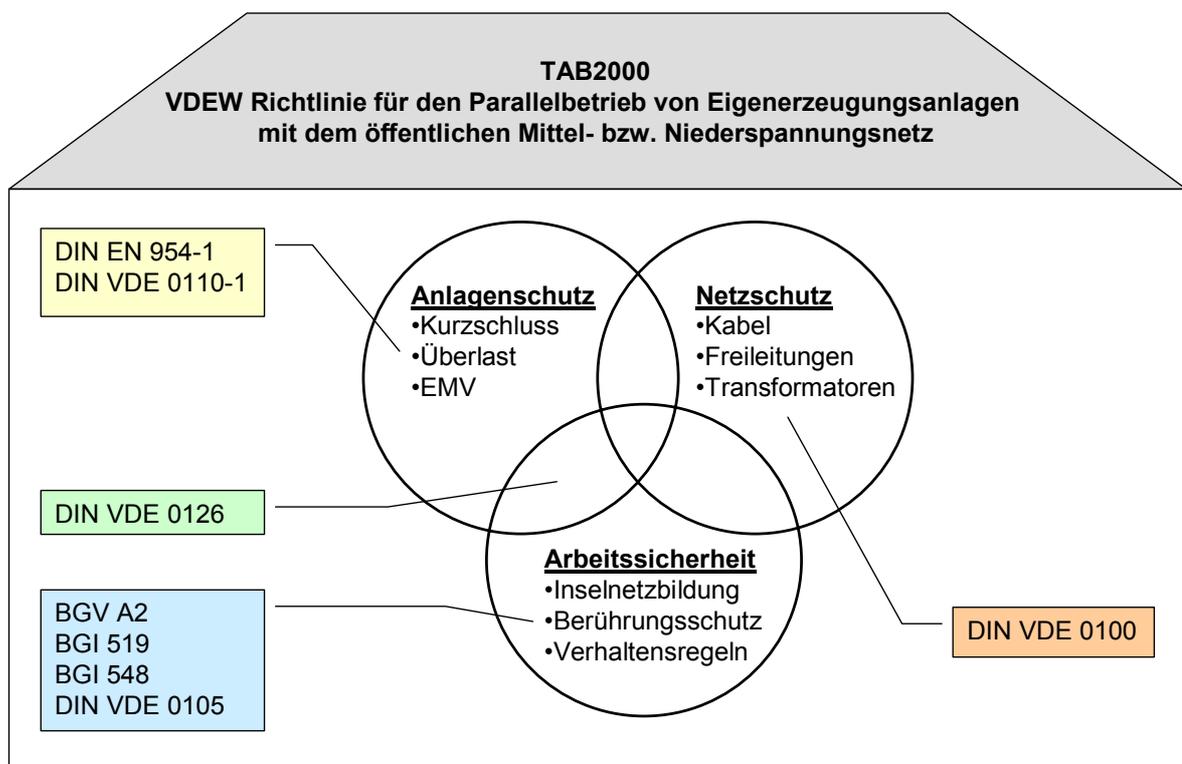


Bild 7.1: Schutzziele und dazugehörige Normen

Neben den möglichen Einschränkungen des Betriebs von KWK-DEA aufgrund schutztechnischer Aspekte werden betriebliche Einschränkungen erläutert, die aufgrund der Sicherstellung des reibungslosen Netzbetriebes bzw. abrechnungsbedingt notwendig sind. In diesem Zusammenhang wird näher auf mögliche Netznutzungsverträge mit dem Netzbetreiber und Verträge mit Grundeigentümern eingegangen.

7.1 Netzschutz

Grundlegend zur Bewertung und Auslegung des Netzschutzes ist die Kenntnis der subtransienten dreipoligen Kurzschlussleistung, die nach DIN EN 60909 [18] berechnet wird. Die hieraus resultierenden Kurzschlussströme dienen einerseits als Auslegeskriterium für

die Betriebsmittel wie z.B. Sammelschienen etc., andererseits müssen sie zur Parametrierung der einzelnen Schutzgeräte herangezogen werden. Ziel der Betrachtung ist eine Analyse des bestehenden Systems und die Feststellung ggf. notwendiger Ausbaumaßnahmen einzelner Betriebsmittel in Hinblick auf den möglichen Anschluss von KWK-DEA. Bezüglich des bestehenden Schutzsystems werden, falls notwendig, Restrukturierungsvorschläge gegeben. Die Betrachtungen basieren auf den in Bild 5.15 und Bild 5.19 gegebenen Netztopologien.

Bezüglich der installierten Technik sind ausschließlich umrichtergeführte Anlagen angenommen worden, da erwartet wird, dass diese die dezentrale Einspeisung dominieren werden. Zur Abschätzung der subtransienten Kurzschlussströme wurde eine Analyse am Markt verfügbarer KWK-DEA kleinerer Leistung und dazugehöriger Umrichter durchgeführt. Da ein beabsichtigter Betrieb von Teilnetzen als Inselnetze im Fehlerfall auch in 20 Jahren als unwahrscheinlich gilt, wurden netzgeführte Umrichter als Referenz gewählt. Entsprechend gängiger Typen sind Kurzschlussströme von

$$I_k'' = 1,2 \cdot I_N \quad (7.1)$$

angesetzt worden. Wird im Zuge der Netzausbauplanung eine Inselnetzbildung vorgesehen, so ist statt dem Faktor 1,2 der Faktor 3 anzusetzen. Bei Einspeisungen über einen Wechselstromgenerator ist mit Stoßkurzschlussströmen zu rechnen, die den Effektivwert des Nennstroms um den Faktor 21 übersteigen (vgl. [19], Absatz 18.1). Speziell bei Synchronmaschinen sind laut [19] im stationären Bereich Nennstromüberhöhungen um maximal 50% für mindestens 15 Sekunden zu berücksichtigen.

7.1.1 Niederspannungsebene

Im Niederspannungsnetz (Bild 5.15) liegt eine stark verzweigte Strahlnetztopologie vor. Im Verhältnis zu ihrem Nutzen ist eine umfassende Darstellung der berechneten Kurzschlussleistung hierfür als zu aufwändig zu betrachten. Stattdessen wird sie auf den längsten Netzstrahl beschränkt, der in Bild 5.15 grau hinterlegt ist. Diese Werte decken den kompletten Bereich der hier auftretenden Kurzschlussleistung ab, so dass aus diesen Ergebnissen alle relevanten Informationen für die Bewertung von Netz- und Anlagenschutz extrahiert werden können.

Hier sind vor allem die möglichen Rückwirkungen durch KWK-DEA auf das Netz und die dort installierten Anlagen inklusive Schutztechnik von Relevanz. Deshalb ist für die Kurzschlussleistung des Mittelspannungsnetzes zunächst ein Worst-Case-Wert von 20 MVA angesetzt worden, um den größtmöglichen Einfluss durch die KWK-DEA abzuschätzen. Dies entspricht einem schwachen ländlichen Netz. Im Gegensatz dazu steht die mittelspannungsseitig real vorhandenen Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt von rund 150 MVA im Referenzszenario und 180 MVA im Szenario 100% (vgl. Abschnitt 7.1.2). Um diesen Realfall und Netze mit höherer mittelspannungsseitiger Kurzschlussleistung abzudecken, erfolgte abschließend eine Berechnung mit 300 MVA mittelspan-

nungsseitiger Kurzschlussleistung. Die Festlegung der Obergrenze erfolgte anhand der 20-kV-seitigen Kurzschlussleistung in der speisenden Umspannanlage des betrachteten Mittelspannungsnetzes, die sich auf rund 280 MVA beläuft. Auf die Darstellung einer Variante mit dem allgemein in der 20-kV-Ebene üblichen Maximum von 500 MVA ist hier wegen der fehlenden Randbedingungen verzichtet worden.

Bild 7.2 zeigt den Verlauf der subtransienten Kurzschlussleistung im betreffenden Netzstrahl bei 20 MVA Kurzschlussleistung auf der Mittelspannungsseite. Der erste Datenpunkt referenziert die Ortsnetzstation (ONS) des untersuchten Niederspannungsnetzes, der letzte den am weitesten von der ONS entfernten Verzweigungspunkt. Allgemein werden sowohl Kabelverteilerschränke als auch die Abzweigmuffen zu den einzelnen Hausanschlüssen bzw. T-Muffen als solche Punkte angesehen. Knickstellen im Verlauf stellen größere Verzweigungspunkte des dargestellten Strahls dar, von denen ausgehend entsprechend größere Teilnetze versorgt werden. Bei der Darstellung des Bereichs hinter Strahlverzweigungen ist grundsätzlich das längste folgende Restsegment des Strahls gewählt worden.

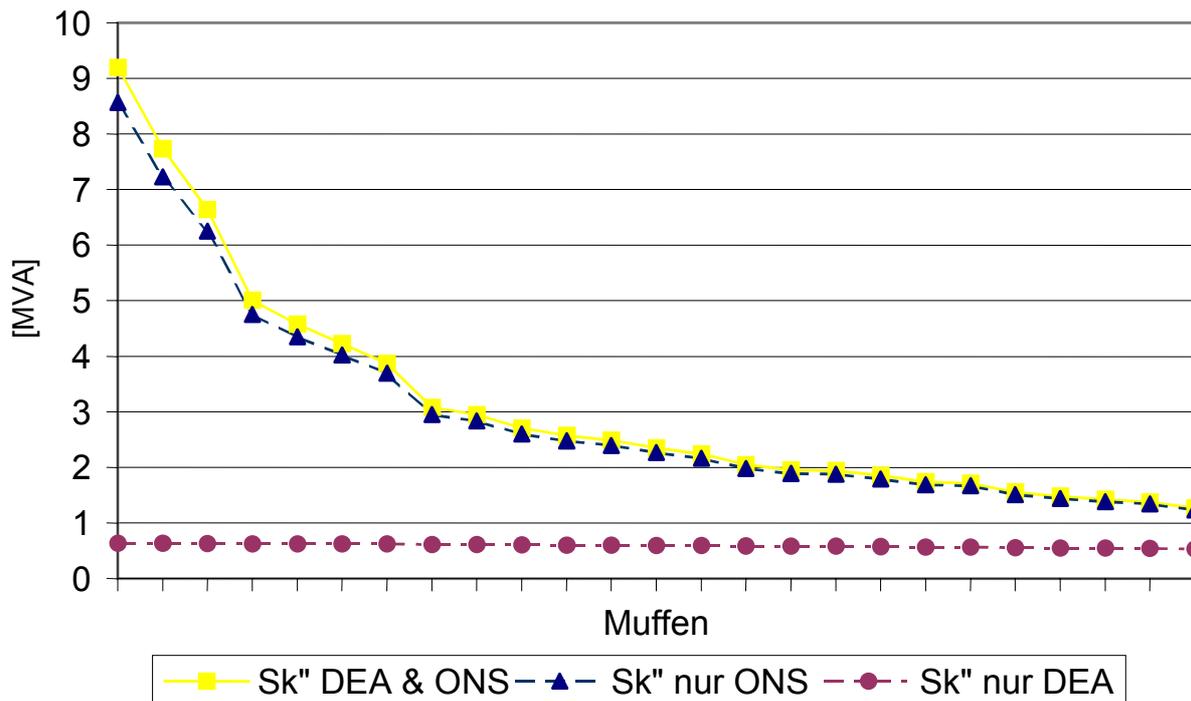


Bild 7.2: Kurzschlussleistungen in MVA an verschiedenen Punkten im Niederspannungsnetz bei 20 MVA Kurzschlussleistung am Anschlusspunkt

Es sind Berechnungen für einen Referenzfall ohne KWK-DEA, für einen Fall flächendeckender Einspeisung und für den Fall, dass der mittelspannungsseitige Anteil der Kurzschlussleistung vernachlässigt wird („nur DEA“) durchgeführt worden. Wie zu erwarten, bleibt der Verlauf der Kurzschlussleistung in diesem Szenario aufgrund der Gleichverteilung der Anlagen weitestgehend konstant bei rund 0,5 MVA. Dagegen wird im Referenzszenario die subtransiente Kurzschlussleistung durch den Ortsnetztransformator (Nennleistung 630 kVA) auf rund 9,5 MVA gedämpft und nimmt mit steigender Entfernung von der ONS weiter ab. Minimal werden rund 1,2 MVA erreicht. Im Szenario „DEA und ONS“ ist an der Ortsnetzstation eine Anhebung der Kurzschlussleistung um rund 0,5 MVA zu beobachten, während sie am Strahlende näherungsweise unverändert im Bezug auf das Referenzszenario bleibt.

Analog hierzu ist entsprechend Bild 7.3 der Verlauf der subtransienten Kurzschlussleistung bei einer mittelspannungsseitigen Kurzschlussleistung von 300 MVA. Diese wird durch die Drosselfunktion des ONT auf rund 15 MVA im Referenzszenario gedämpft und fällt über die Strahllänge ebenfalls auf rund 1,2 MVA am Strahlende ab. Das Szenario „Nur DEA“ bleibt im Vergleich zur 20 MVA-Variante unverändert. Auch in der 300 MVA-Variante lässt sich im ONS-Bereich eine Anhebung der subtransienten Kurzschlussleistung um rund 0,5 MVA beobachten, am Strahlende liegen die Werte ebenfalls im Bereich des Referenzszenarios.

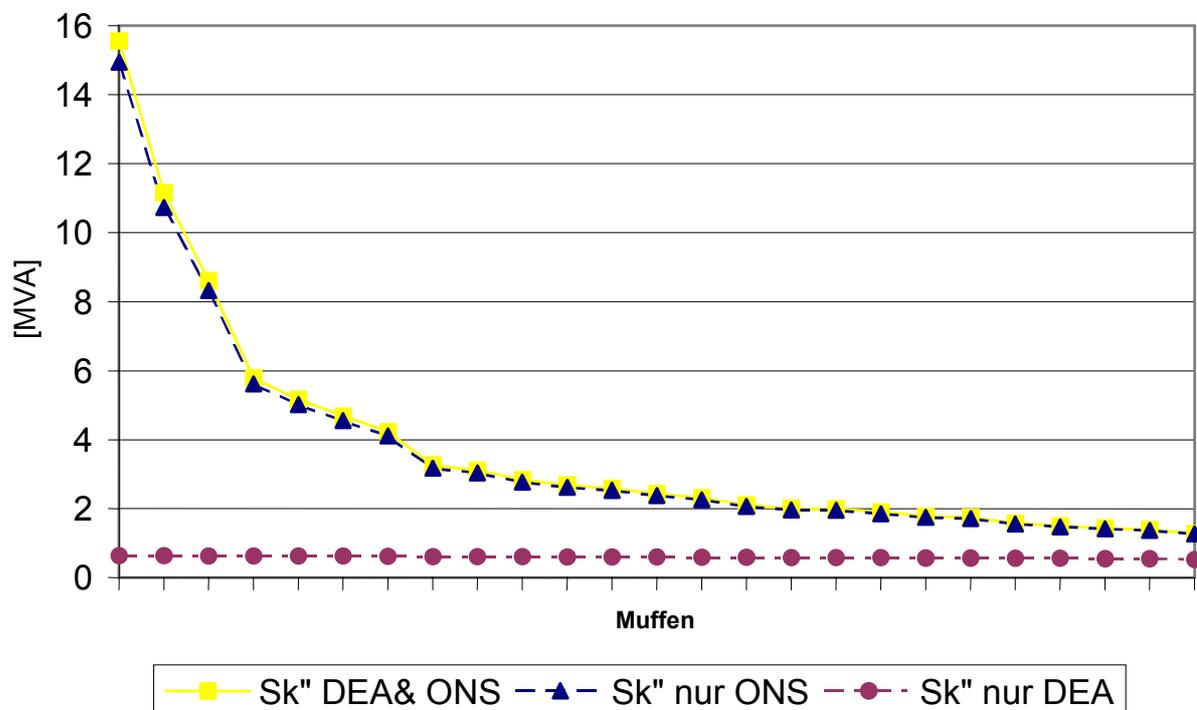


Bild 7.3: Kurzschlussleistungen im Niederspannungsnetz bei 300 MVA

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass bei den hier getroffenen Annahmen (Einspeisung aus KWK-DEA nur über Wechselrichter) trotz massiver dezentraler Einspeisung auch in der 20-MVA-Variante der Verlauf der Kurzschlussleistung in allen Netzbereichen durch die vom Netz gelieferte Kurzschlussleistung dominiert wird. Zum Endbereich des Netzstrahls hin nimmt der Anteil der Kurzschlussleistung der KWK-DEA an der gesamten Kurzschlussleistung zu. Folglich ist hier bei der Auswahl der Umrichtertechnologie besonderer Wert auf die Qualität der zur Verfügung gestellten Spannung zu legen, da sich etwaige Störungen konstruktiv überlagern können und ggf. nicht mehr durch das überlagerte Netz ausgeglichen werden können. Hierzu sei auf die VDEW-Richtlinie zum Anschluss von Eigenerzeugungsanlagen an das Niederspannungsnetz [10] und die aktuellen Aktivitäten in den Normungsgremien bezüglich dezentraler Einspeisungen (siehe z.B. E DIN VDE 0126 [20]) hingewiesen, in denen Anschlussbedingungen und erforderliche Schutzrichtungen für Eigenerzeugungsanlagen erarbeitet werden.

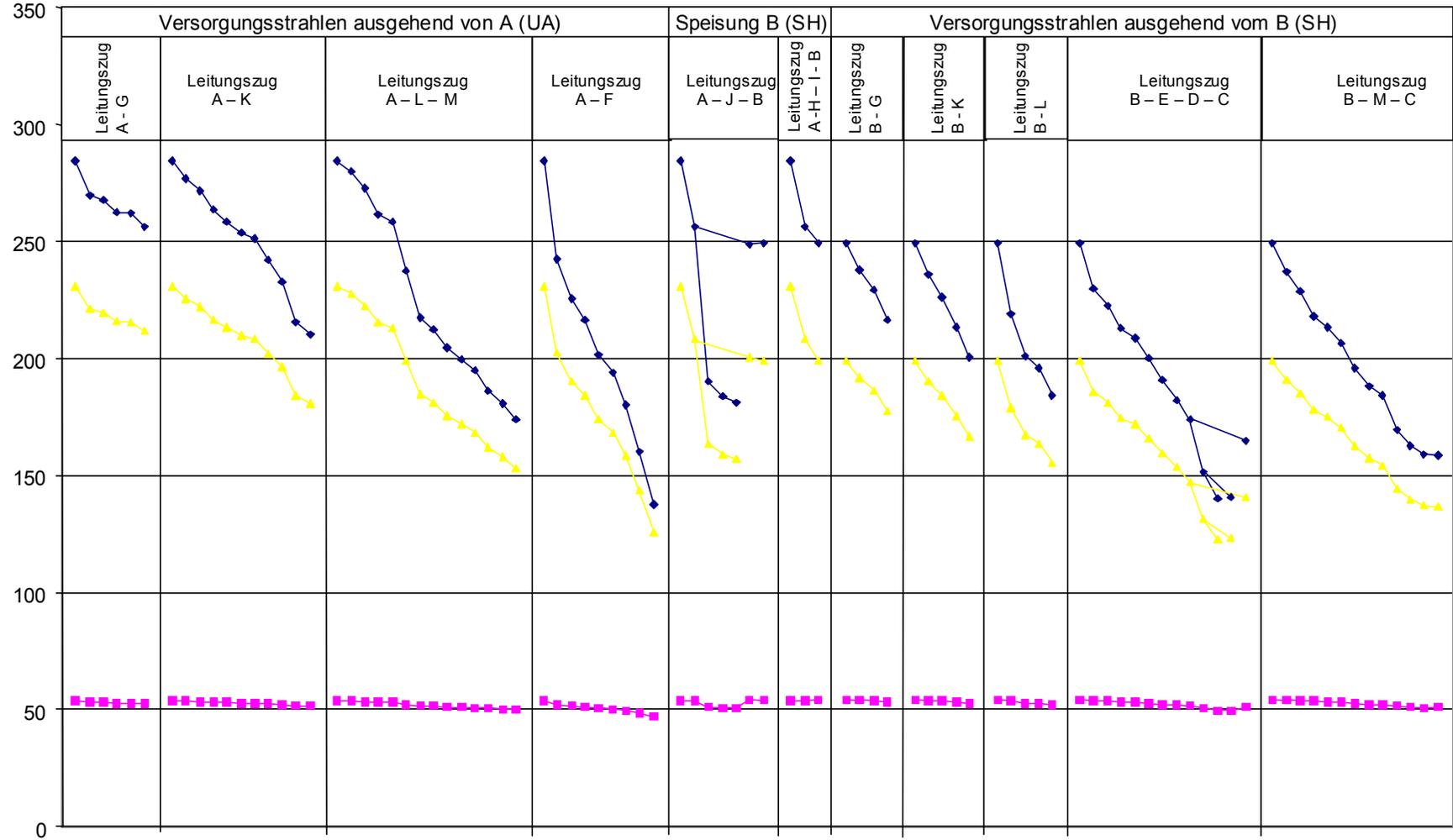
Die hier gemachten Annahmen setzen ein unverändertes Niveau der Kurzschlussleistungen in den überlagerten Spannungsebenen voraus. Da jedoch auch in dieser Spannungsebene mit steigender dezentraler Einspeisung zu rechnen ist, ist diese in einem weiteren Schritt ebenfalls zu überprüfen.

7.1.2 Mittelspannungsebene

Die Kurzschlussrechnungen in der Mittelspannungsebene erfolgte unter Annahme einer Kurzschlussleistung von 3696 MVA auf der 110-kV-Seite der Umspannanlage, die derzeit an diesem Netzknoten real ansteht. Analog zu Abschnitt 7.1.1 ist die dreipolige Kurzschlussleistung an allen Netzknoten berechnet worden. Dabei sind ebenfalls die drei Szenarien „Referenz“, „DEA/Netz“ und „Nur DEA“ analysiert worden.

Bild 7.4 und Bild 7.5 zeigen die subtransienten Kurzschlussleistungen und –ströme im gesamten Netz untergliedert nach den in Bild 5.19 dargestellten Versorgungssträngen. Durch Trennstellen unterbrochene Leitungen kommen in der Darstellung mehrfach vor. Vorhandene Stiche sind ebenfalls dargestellt worden. Erwartungsgemäß sind die Stickleitungen schwächer als die Hauptleitungszüge ausgelegt, so dass die Kurzschlussleistung in diesem Bereich absinkt. Mit zunehmender Entfernung von der Umspannanlage fallen die Kurzschlusswerte zumeist monoton ab. Die Ausnahme bilden die beiden letzten Knoten im Leitungszug A-J-B. Hier steigt die Kurzschlussleistung von der letzten Station auf der Leitung zum Schalthaus hin wieder an. Ursache hierfür ist der vermaschte Betrieb der Leitungsstränge A-J-B und A-H-I-B auf dieser Trasse.

S_k [MVA]

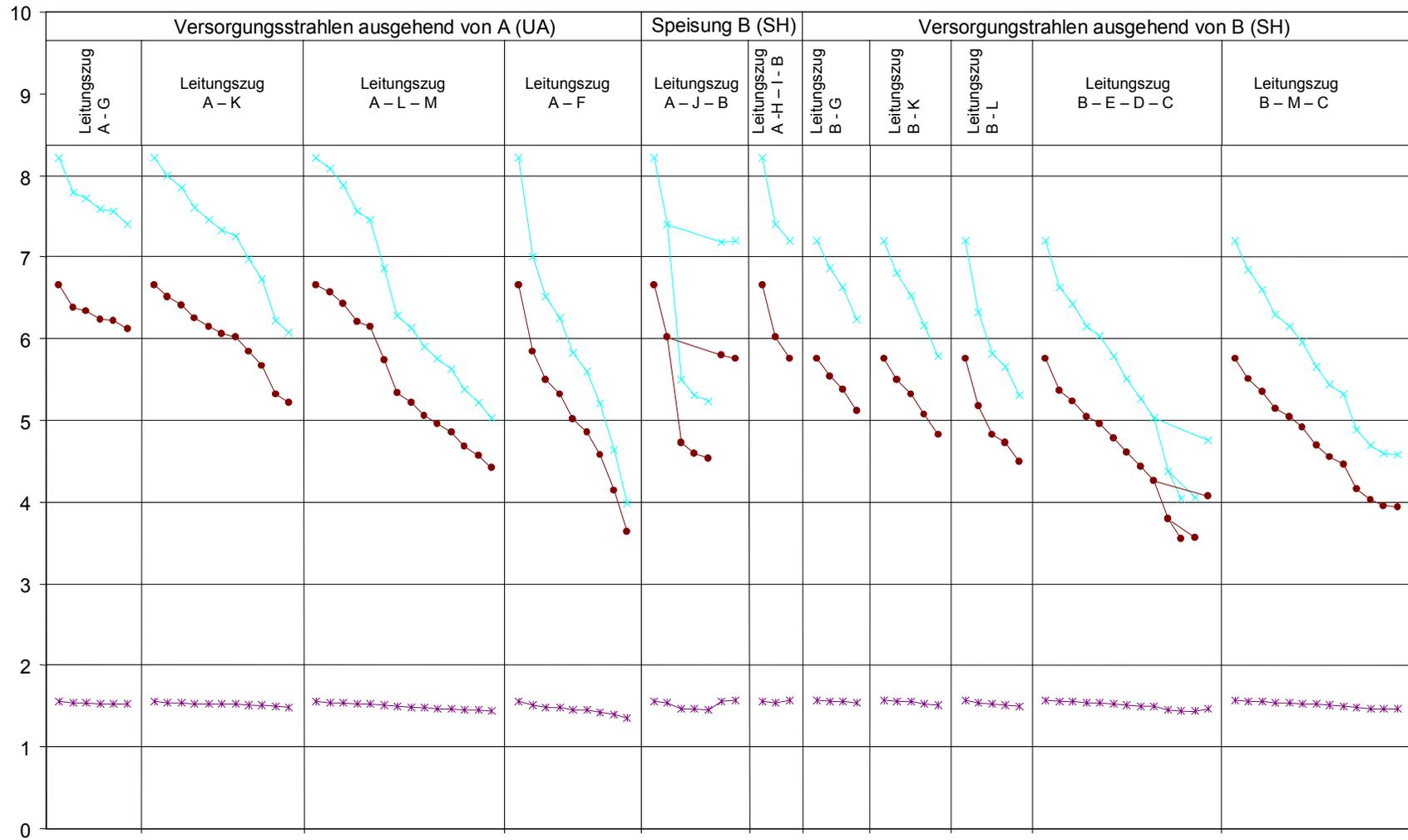


Leitungszüge entsprechend Bild 5.19



Bild 7.4: Subtransiente Kurzschlussleistung nach Leitungszügen im Mittelspannungsbereich

I_k [kA]



Leitungszüge entsprechend Bild 5.19



Bild 7.5: Subtransiente Kurzschlussströme nach Leitungszügen im Mittelspannungsnetz

Im Mittelspannungsbereich ist im Gegensatz zum Bereich der Niederspannung ein deutlicher Anstieg der Kurzschlussleistung durch die KWK-DEA im Szenario DEA/Netz zu verzeichnen. Hier ist ein Anstieg der Kurzschlussleistung maximal um 17% (40MVA) vorhanden. Dies macht eine weitere Analyse des Netzes auf ausreichende Stoßkurzschlussstromfestigkeit der Betriebsmittel notwendig, was im Rahmen dieser Studie nicht weiter verfolgt worden ist.

Bedingt durch Superposition stellt sich im Szenario „Nur DEA“ eine Kurzschlussleistung von rund 50 MVA in relativer Gleichverteilung ein. Das Verhältnis zur geringsten auftretenden Kurzschlussleistung im Szenario „DEA und Netz“ auf dem Leitungszug A-F beläuft sich auf rund 2,4. Folglich sind in der Mittelspannung durch KWK-DEA auftretende Störungen in der Spannungsqualität als eher geringfügig zu bewerten.

In Bezug auf die 110-kV-Ebene ist zu bemerken, dass nun auch aus dem Verteilnetz im Fehlerfall subtransiente Kurzschlussleistung in die Hochspannungsebene eingespeist wird. Unter der Voraussetzung der relativ hohen Kurzschlussleistung von 3696 MVA im betrachteten Netzbereich dort kann diese jedoch als geringfügig vernachlässigt werden, sofern nur wenige Mittelspannungsnetze flächendeckend mit KWK-DEA ausgerüstet worden sind. Ist diese Voraussetzung nicht gegeben, muss mit Superpositionseffekten gerechnet werden und eine Überprüfung der 110-kV-Ebene wird notwendig.

Alle Berechnungen sind auf Basis eines leistungsstarken Netzes unternommen worden. Ganzheitlichen Betrachtungen zur Folge ist bei dem flächendeckenden Einsatz von KWK-DEA damit zu rechnen, dass sich in der Hoch-/Höchstspannungsebene eine Überkapazität an Einspeiseleistung einstellen wird. Als Konsequenz daraus ist mit einer Reduktion der Kraftwerksleistung in dieser Ebene zu rechnen. Die Folge hiervon ist, dass einige der zentralen generatorischen Erzeugungseinheiten durch viele dezentrale Einheiten ersetzt werden. Da letztere in erster Linie auf Umrichtertechnologie beruhen werden, ist mit einer Reduktion der Kurzschlussströme zu rechnen. Die Auswirkungen einer solchen Entwicklung können durch den Bezug der von netzgeführten Umrichtern gelieferten Kurzschlussströme auf die durch generatorische Einspeisungen gelieferten abgeschätzt werden. Gemäß den Ausführungen unter Abschnitt 7.1 ist bei Generatoren ein maximaler Stosskurzschlussstrom i_p von $21 \cdot I_n$ zu erwarten. Daraus kann ein subtransienter Kurzschlussstrom von

$$I_k'' = \frac{i_p}{\sqrt{2} \cdot \kappa} \quad \text{mit } \kappa \in [1,2] \quad (7.2)$$

berechnet werden. Daraus ergibt sich bei Annahme eines Punktnetzes und κ -Werten gemäß (7.2) im Extremfall der ausschließlichen Einspeisung durch Umrichter ein Reduktionsfaktor von

$$f_{red,100} = \frac{I_{k,Umrichter}''}{I_{Generator}''} = \frac{1,2}{21/\sqrt{2} \cdot \kappa} = 8 \div 16\% \quad (7.3)$$

Im unter Abschnitt 5 angenommenen Fall einer realistischen Durchdringung von maximal 20% des technischen Potenzials binnen 20 Jahren berechnet sich der Reduktionsfaktor zu

$$f_{red,20} = \frac{0,2 \cdot I_{k,Umrichter}'' + 0,8 \cdot I_{k,Generator}''}{I_{Generator}''} = 0,2 \cdot \frac{1,2}{21 / \sqrt{2} \cdot \kappa} + 0,8 = 84 \div 88\% \quad (7.4)$$

Hinzu kommt eine weitere Dämpfung der Kurzschlussleistung durch die im Verteilnetz erhöhten Leitungsimpedanzen und installierten Transformatoren. Folglich ist in Zukunft unter der Voraussetzung eines bundesweit flächendeckenden Einsatz von KWK-DEA mit einem signifikanten Rückgang der subtransienten Kurzschlussleistung in der 110-kV-Ebene zu rechnen, der relativ stark von dem Durchdringungsgrad der KWK-DEA abhängig ist. Dadurch bedingt sind in diesem Fall gesonderte Maßnahmen zu treffen, die eine ausreichend hohe Kurzschlussleistung zur Gewährleistung der Funktionalität der installierten Schutzgeräte sicherstellen. Die in diesem Projekt durchgeführten Berechnungen sind dann unter den veränderten Rahmenbedingungen zu wiederholen. Hierbei ist eine Analyse eines kompletten Hochspannungsnetzausschnittes vorzunehmen, wobei insbesondere die o.a. Abschätzung durch ganzheitliche Durchdringungsszenarien zu ergänzen ist, die auch Industrie und Gewerbe sowie ländliche Gebiete umfassend berücksichtigen. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wird dies nicht weiter verfolgt.

7.2 Anlagenschutz

Der Anlagenschutz hat als Schutzziel, abnormale Betriebszustände zu detektieren und die Anlage vom Netz zu trennen bzw. herunterzufahren, sofern der jeweilige Betriebszustand sich schädigend auf die Anlage auswirkt. Ursächlich ist hier zwischen externen Einflüssen, die aus dem Netz in die Anlage übertragen werden und internen Einflüssen, die lokal in der KWK-DEA entstehen, zu unterscheiden. Tabelle 7.1 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Überwachungsgrößen. Im Bereich der externen Einflüsse kann der Anlagenschutz mit dem Netzschutz kombiniert werden, da hier die zu überwachenden Größen identisch sind. Hier ist vor allem der Einspeisestrom zu nennen, der aufgrund der thermischen Belastbarkeit der Anlage begrenzt werden muss.

Tabelle 7.1: Überwachungsgrößen bei KWK-DEA

Externe Überwachungsgröße	Interne Überwachungsgröße
<ul style="list-style-type: none"> • Einspeisestrom • Netzspannung • Netzimpedanz 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur • Brennstoffzufuhr

Im Allgemeinen können Fehlersituationen entsprechend Tabelle 7.2 auftreten, die mit den entsprechenden Schutzmechanismen abgefangen werden können. Im Speziellen ist der Anlagenschutz vom jeweiligen Anlagentyp und –hersteller abhängig. Eine genaue Analyse wird hier nicht weiter verfolgt, da in den Betrachtungen dieses Forschungsprojektes die elektrischen Netze im Primärfokus stehen. Es jedoch ist festzuhalten, dass aufgrund der gemeinsamen externen Überwachungsgrößen erhebliche Synergiepotentiale bestehen, die eine Kombination der Schutzgeräte zum Netz- und Anlagenschutz auf der DEA-Seite empfehlenswert machen.

Tabelle 7.2: Fehlersituationen

Größe	Fehlersituation	Auswirkung	Schutzmechanismus
Speisestrom	<ul style="list-style-type: none"> • Netzkurzschluss • Lokale Netzüberlast (z.B. Inselnetzbildung oder Leitungsausfall) 	<ul style="list-style-type: none"> • Thermische Überlast • Zerstörung des elektrischen Anlagenteils 	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherungen • Leistungstrennstelle
Netzspannung	<ul style="list-style-type: none"> • Überspannung durch <ul style="list-style-type: none"> - Blitzeinschlag - Schalthandlung 	<ul style="list-style-type: none"> • Zerstörung des elektrischen Anlagenteils 	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilableiter
	<ul style="list-style-type: none"> • Unterspannung (z.B. lokale Netzüberlast oder Unterversorgung) 	<ul style="list-style-type: none"> • Thermische Überlast • Zerstörung des elektrischen Anlagenteils 	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungstrennstelle
Netzimpedanz	<ul style="list-style-type: none"> • Inselnetzbildung bedingt <ul style="list-style-type: none"> - lokale Überlast - Fehlsynchronisation bei Rückkehr des überlagerten Netzes 	<ul style="list-style-type: none"> • Thermische Überlast • Zerstörung des elektrischen Anlagenteils 	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungstrennstelle <ul style="list-style-type: none"> - allgemein - ENS
Betriebs-temperatur	<ul style="list-style-type: none"> • Unzulässige Überhitzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Thermische Schädigung 	<ul style="list-style-type: none"> • Regelungseinheit zum geordneten Herunterfahren im Fehlerfall
Brennstoff-zufuhr	<ul style="list-style-type: none"> • Unterversorgung der DEA mit Brennstoff 	<ul style="list-style-type: none"> • Schaden durch undefinierte Betriebszustände bei Versorgungsunterbrechung 	

7.3 Arbeitssicherheit

In Bezug auf die Arbeitssicherheit sind vor allem die berufsgenossenschaftlichen Regelungen relevant. Von besonderer Bedeutung ist die Unfallverhütungsvorschrift BGV A2 „Elektrische Anlagen und Betriebsmittel“ [21] bei Verteilnetzen in Verbindung mit der DIN VDE 0105-100 „Betrieb von elektrischen Anlagen“ [22]. Beide enthalten allgemeine Regelungen für Arbeiten an elektrischen Anlagen- und Betriebsmitteln. Sie gelten daher auch für Arbeiten an KWK-DEA sowie bei Arbeiten an elektrischen Verteilnetzen.

Die Errichtung, wie auch der Betrieb einer KWK-DEA, muss nach den Grundsätzen der BGV A2 erfolgen. Dies schließt die Einhaltung der entsprechenden Normen ein. Darüber hinaus müssen defekte Anlagen unverzüglich repariert oder ggf. bis zur Reparatur stillgesetzt werden (§3). Ebenso sind an den Anlagen im Betrieb regelmäßig Prüfungen auszuführen (§5). Kritisch in diesem Zusammenhang ist die Frage, in wie weit private Betreiber diese Regelungen umsetzen dürfen. Mit defekten oder schlecht gewarteten KWK-DEA geht automatisch auch ein Gefährdung des Betriebspersonals von Netzbetreibern einher.

Sollten für die KWK-DEA keine zutreffenden technischen Regelungen vorliegen, so sind die allgemeinen Grundsätze nach § 4 einzuhalten. Diese umfassen allgemeine Anforderungen bezüglich Arbeitssicherheit, Berührungsschutz, Wartung und Isolierung der spannungsführenden Teile. Die Formulierung ist dabei so allgemein gewählt worden, dass für beliebige Anlagen ein bestimmtes Mindestmaß an Sicherheit erreicht wird.

Die BGV A2 untersagt im Allgemeinen das Arbeiten an unter Spannung stehenden Teilen (§6) sowie das Arbeiten in der Nähe von unter Spannung stehenden Teilen (§7), sofern diese nicht gegen Berühren geschützt sind (vgl. Abschnitt 7.3.2). Gleiches gilt für das Bedienen von Anlagen. Insofern muss bei Arbeiten in elektrischen Verteilnetzen sichergestellt werden, dass die Arbeitsstelle vollständig freigeschaltet sind.

7.3.1 Einhaltung der fünf Sicherheitsregeln

Die Durchführungsanweisung zu §6 regelt im Sinne einer Arbeitsanweisung das Vorgehen bei Arbeiten an Anlagen. Bei Arbeiten im Netz ist diesbezüglich die Einhaltung der fünf Sicherheitsregeln am wichtigsten, da diese gewährleisten, dass keine Spannung am Arbeitsort anliegt bzw. wieder anliegen kann.

In diesem Zusammenhang sind die BGI 519 „Sicherheit bei Arbeiten an elektrischen Anlagen“ [23] und die BGI 548 „Sicherheitslehrbrief für Elektrofachkräfte“ [24] zu erwähnen, die beide im Wesentlichen die gleichen Inhalte aufweisen. Beide Informationen stellen das sichere Arbeiten in elektrischen Anlagen dar. Neben Begriffsdefinitionen und Folgen der Exposition von Menschen zu elektrischem Strom werden Arbeitsmittel, persönliche Schutzausstattung inklusive ihrer Anwendung sowie die vorschriftsmäßige Bedienung von Anlagen beschrieben. Wichtigster Teil beider Informationen ist die Darstellung des Arbeitens in elektrischen Anlagen sowie das Arbeiten unter Spannung (AUS) in elektrischen Anlagen (vgl. Abschnitt 7.3.2).

Als Regelfall soll in elektrischen Anlagen nur im spannungsfreien Zustand gearbeitet werden. Diesbezüglich ist der wichtigste Punkt beim Arbeiten die Einhaltung der fünf Sicherheitsregeln, die hier mit Ihrer Bedeutung für KWK-DEA aufgelistet werden:

1. Freischalten

Grundsätzlich sind alle an die Arbeitsstelle heranführenden Leitungen freizuschalten. Dies ist bei Ringnetzen oder vermaschten Netzen besonders zu beachten, da von mehreren Seiten Spannung an die Arbeitsstelle gelangen kann. KWK-DEA, die sich in einem freigeschalteten Netzbereich befinden, müssen entweder durch ihre anlageninterne Einrichtung (z.B. ENS, E DIN VDE 0126 [20]) automatisch freigeschaltet werden oder die Schaltstelle mit Trennfunktion muss manuell geöffnet werden.

2. Gegen Wiedereinschalten sichern

Das Sichern gegen Wiedereinschalten muss auch bei KWK-DEA durchgeführt werden. Bei manuell freigeschalteten KWK-DEA muss dies durch Kennzeichnung oder entsprechende Schließeinrichtungen erfolgen. Für KWK-DEA, die durch ihre anlageninterne Einrichtung automatisch freigeschaltet worden sind, muss diese Einrichtung das Wiederaufschalten zuverlässig verhindern.

3. Spannungsfreiheit feststellen

Dem Feststellen der Spannungsfreiheit kommt besondere Bedeutung bei, da trotz freigeschaltetem Einspeisepunkt in einen Netzbezirk KWK-DEA, insbesondere fehlerhafte KWK-DEA, einspeisen können. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch die Prüfung aller an die Arbeitsstelle heranführenden Leitungen.

4. Erden und Kurzschließen

Sind in den Netzen KWK-DEA vorhanden, ist das Erden und Kurzschließen unerlässlich, da es, zum Beispiel durch eine defekte KWK-DEA, zu einer ungewollten Einspeisung kommen kann. Hier kann die nach BGI erlaubte Ausnahme, nach der im Niederspannungsbereich auf diese Regel verzichtet werden kann, nicht mehr zugelassen werden. Ursache hierfür ist, dass die Arbeitsstelle nicht mehr wie gefordert, z.B. durch das Herausnehmen von Sicherungen, sicher freigeschaltet werden kann.

5. Benachbarte unter Spannung stehende Teile abdecken oder abschränken

7.3.2 Arbeiten unter Spannung (AuS)

Das AuS ist grundsätzlich nur in Ausnahmefällen unter „zwingenden Gründen“ erlaubt. Die BGV A2 und die beiden o.g. BGI definieren hierzu bestimmte technischen Bedingungen, die jedoch für Niederspannungsnetze der öffentlichen Energieversorgung meist nicht zutreffend sind.

Bei Arbeiten unter Spannung muss nach BGV A2 darauf geachtet werden, dass durch die verwendeten Werkzeuge oder Arbeitsmethoden keine Gefährdung für das Personal eintritt (§8).

Als „zwingenden Gründen“ werden laut BGI die folgenden Gründe aufgeführt (auszugsweise):

- Es ist eine Gefährdung von Leben und Gesundheit von Personen zu befürchten.
- Es würde in Betrieben ein erheblicher wirtschaftlicher Schaden entstehen.
- Bei Arbeiten in Netzen der öffentlichen Stromversorgung, besonders beim Herstellen von Anschlüssen, Umschalten von Leitungen oder beim Auswechseln von Zählern, Rundsteuerempfängern oder Schaltuhren würde die Stromversorgung von einer größeren Anzahl von Verbrauchern unterbrochen.

Die beschriebenen Arbeitsmethoden, wie die Durchführung der Arbeiten durch eine Elektrofachkraft sowie die Verwendung von isoliertem Werkzeug und isolierenden Matten, sind auch bei Netzen mit dezentralen Energieerzeugungsanlagen möglich. Allerdings sollte beachtet werden, dass im Falle der Entstehung eines Lichtbogens dieser nicht nur aus der Netzeinspeisung, sondern prinzipiell auch von DEA gespeist werden kann.

7.4 Parallelbetrieb mit dem öffentlichen Netz

Ein wichtiger Aspekt für alle oben genannten Bereiche ist eine mögliche Inselnetzbildung von mehreren kleinen dezentralen Anlagen in einem Netzbezirk (Bild 7.6). Ein Inselnetz kann zum Beispiel durch eine fehlerbedingte Abschaltung am Ortsnetztransformator oder auch durch eine wartungsbedingte Abschaltung auftreten. Hier wird eine kombinierte Betrachtung der unter den Abschnitten 7.1 bis 7.3 dargestellten Aspekte notwendig. Die Folgen bei einem Netzausfall mit Weiterbetrieb mehrerer dezentrale Anlagen können hinsichtlich des Anlagen- und Netzschutzes eine kurzfristige Speisung eines Kurzschlusses, thermische Überlastung des Wechselrichters und anderer Netzbetriebsmittel sowie eine Spannungsverschleppung bei einer einphasigen Einspeisung sein. Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist die Arbeitssicherheit.

Obwohl in der Praxis eine Inselnetzbildung sehr selten [25] und wahrscheinlich nur für kurze Zeit eintritt (nur bei einem Leistungsgleichgewicht zwischen dezentraler Erzeugung und

Verbrauch), sind entsprechende Sicherheitseinrichtungen vorzusehen. Daher ist nach den VDEW Empfehlungen [10] der Anschluss einer Eigenerzeugungsanlage an das Niederspannungsnetz nach VDE 0100-551 in Deutschland nur über eine dem Personal des Versorgungsnetzbetreibers (VNB) jederzeit zugängliche Schaltstelle mit Trennfunktion möglich. Diese Schaltstelle ist nicht erforderlich, wenn eine ENS (Einrichtung zur Netzüberwachung mit jeweils zugeordnetem Schaltorgan) mit einem Prüfzertifikat auf der Basis E DIN VDE 0126 oder ein dreiphasiger Spannungsrückgangsschutz in Reihe zu der jeweiligen KWK-DEA eingebaut ist. Die ENS wird zwischen das Niederspannungsnetz und die KWK-DEA geschaltet und verhindert eine unbeabsichtigte Einspeisung der KWK-DEA in das Verteilnetz, wenn die Spannung, Frequenz oder die Netzimpedanz bei 50 Hz vorgegebene Werte unter- oder überschreiten bzw. ein Impedanzsprung erkannt wird.

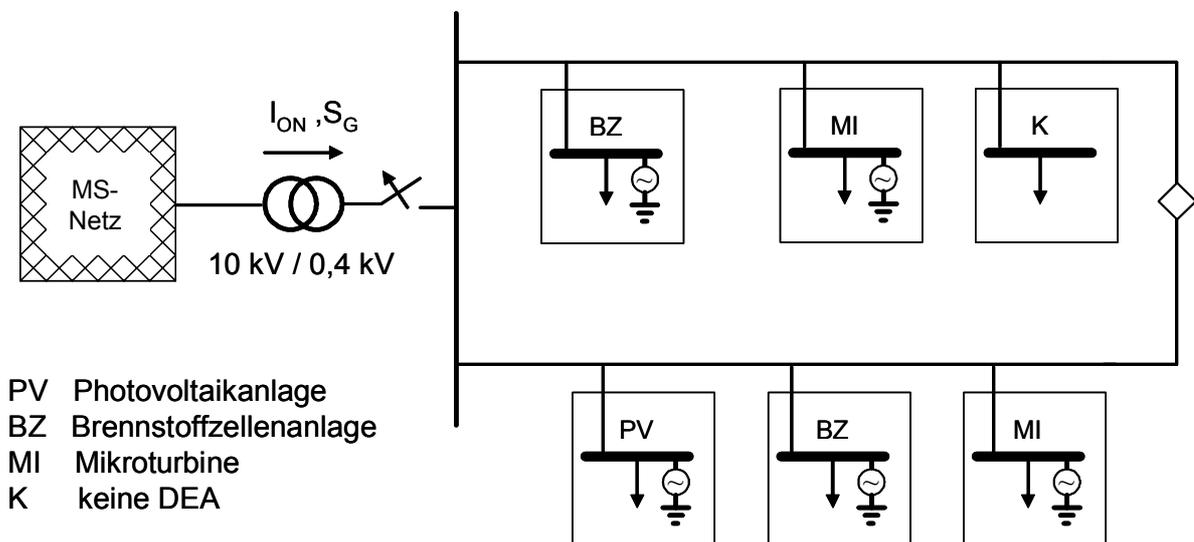


Bild 7.6: Inselnetzbildung durch Netzauftrennung an der ONS

In den letzten Jahren sind von verschiedenen Wechselrichterherstellern Schutzeinrichtungen auf der Basis der Netzimpedanzmessung (ENS) entwickelt worden. Nachteilig ist hier, dass zur Messung methodisch bedingt ein Signal in das Netz eingespeist und die Reaktion gemessen wird (aktives Messverfahren). Erfahrungen mit der ENS wurden bis heute hauptsächlich bei Photovoltaikanlagen gemacht. Es hat sich allerdings gezeigt, dass diese Schutz- einrichtungen zum Teil auch im fehlerlosen Netzzustand ansprechen und die Anlage vom Netz trennen. Hierzu gibt es erste Überlegungen, die Schwellwerte für den Impedanzsprung anzuheben oder eine automatische Anpassung der Schaltschwellen nach Anlagengröße vorzusehen [26]. Ein weiteres Problem ist die gegenseitige Beeinflussung mehrerer ENS in einem Netzbezirk, diese kann zu Fehlauflösung und im ungünstigsten Fall auch zu einem Schutzversagen führen. Dieses Problem kann nur gelöst werden, wenn eine Kommunikation der Anlagen untereinander oder eine strikte zeitliche oder frequenzabhängige Staffelung der ENS vorgesehen wird.

Innerhalb des Forschungsprojektes „Sicherheitsaspekte bei dezentralen netzgekoppelten Energieerzeugungsanlagen“ (SIDENA) [27] werden zur Zeit die Möglichkeiten einer verbesserten Erkennung von Inselnetzen bearbeitet. Neben der Impedanzmessung werden auch alternative Verfahren entwickelt und getestet. Ein Ergebnis SIDENAs ist die Aufstellung eines neuen Arbeitskreises K373.0.09 „Photovoltaische Solarenergie-Systeme“ innerhalb der Deutschen Kommission für Elektrotechnik (DKE). Dieser Arbeitskreis überarbeitet zur Zeit die DIN V VDE V 0126-1-1. Bei der Überarbeitung sollen auch andere DEA wie zum Beispiel Brennstoffzellenanlagen berücksichtigt werden. Eine weitere Änderung wird sein, dass nicht mehr das Schutzprinzip, sondern das entsprechende Prüfverfahren beschrieben wird. Da diese Prüfungen jedoch auf das Impedanzmessverfahren zugeschnitten sind, wird zur Zeit keine andere Methode diese Typenprüfung bestehen. Ob auch andere Verfahren zugelassen werden steht noch nicht fest. Durch diese Änderungen soll die Akzeptanz der ENS im europäischen und internationalen Umfeld verbessert werden.

In wie weit sich eine einheitliche internationale Norm auf Basis einer ENS nach dem Impedanzmessverfahren durchsetzen lässt, kann heute noch nicht beantwortet werden [28]. Auch in Deutschland gibt es Überlegungen, in wie weit eine ENS erforderlich ist [29]. Die hier gemachten Überlegungen gehen davon aus, dass sich in Bezug auf die Arbeitssicherheit eine Gefährdung von Personen bei Arbeiten im Netz durch Einhaltung der fünf Sicherheitsregeln ausschließen lässt. Ob sich die Abschaffung dieser Impedanzmessung durchsetzen lässt, ist aufgrund noch ausstehenden Zustimmungen durch die Berufsgenossenschaft und die Netzbetreiber abzuwarten.

7.5 Vertragliche Einschränkungen durch den Netzbetreiber

7.5.1 Allgemeine vertragliche Bestimmungen für die Einspeisung aus KWK-Anlagen

Der Netzbetreiber hat dafür Sorge zu tragen, dass die von KWK-DEA erzeugte elektrische Energie in das Verteilnetz eingespeist werden kann. Soweit erforderliche Maßnahmen nicht den Anschluss der KWK-Anlage betreffen, hat der Netzbetreiber die hierfür erforderlichen Kosten zu tragen.

Wird eine KWK-Anlage an das elektrische Verteilnetz angeschlossen, wird der Betreiber der Anlage („Einspeiser“) mit dem zuständigen Netzbetreiber einen Stromeinspeisungsvertrag abschließen. Als Beispiel für einen solchen KWK-Stromeinspeisungsvertrag ist im Anhang (Abschnitt 11.3) der Mustervertrag der HSE HEAG Südthessische Energie AG zu finden.

Dieser Vertrag regelt die Abnahme und Vergütung von Strom nach § 3 Absatz 4 des Gesetzes für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung [1]. Er berechtigt den Einspeiser, den in seiner KWK-Anlage erzeugten Strom in das Netz des Vertragspartners einzuspeisen und sichert ihm die Vergütung zu. Der Einspeiser muss dem Netzbetreiber die technischen Daten und die Lage der KWK-DEA mitteilen und eine Zulassung der Anlage nach § 6 KWKG [1] nachweisen.

In der Anlage 2 zum KWK-Stromeinspeisungsvertrag (siehe Anhang) finden sich die allgemeinen und technischen Regelungen für die KWK-Stromeinspeisung. Hierin ist u. a. ausgeführt, dass Planung, Errichtung, Anschluss, Betrieb, Instandhaltung und Änderung der KWK-Anlage des Einspeisers nach den gesetzlichen Bestimmungen sowie den ergänzenden Anforderungen der anerkannten Regeln der Technik durchgeführt werden müssen. Hierbei sind in der jeweils geltenden Fassung einzuhalten:

- die einschlägigen VDE-Bestimmungen (DIN-VDE-Normen),
- die Technischen Anschlussbedingungen (TAB) des Netzbetreibers,
- die VDEW-Richtlinie für den Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen mit dem Mittelspannungsnetz [9] bzw. dem Niederspannungsnetz [10].

Der Einspeiser muss insbesondere seine KWK-Anlage so betreiben, dass dadurch keine unzulässigen Rückwirkungen im Sinne der o. g. Bestimmungen auf das elektrische Verteilnetz eintreten.

Zudem berechtigen die allgemeinen und technischen Regelungen als Bestandteil des Stromeinspeisungsvertrages den Netzbetreiber, vom Einspeiser Änderungen an zu errichtenden oder bestehenden KWK-Anlagen zu verlangen, soweit dies aus Gründen des sicheren und störungsfreien Netzbetriebs erforderlich ist. Die hierdurch entstehenden Kosten gehen zu Lasten des Einspeisers. Auch muss der Einspeiser den Netzbetreiber über Änderungen an seiner KWK-Anlage unterrichten und, soweit diese Maßnahmen Auswirkungen auf den Parallelbetrieb mit dem Netz haben, dessen Zustimmung einholen.

Der Netzbetreiber ist bei Mängeln an der KWK-Anlage oder bei Mängeln in der Führung des Parallelbetriebs, die jeweils Rückwirkungen auf das elektrische Verteilnetz oder Anlagen Dritter haben, berechtigt, nach vorheriger Ankündigung gegenüber dem Einspeiser die KWK-Anlage vom Netz zu trennen.

Die Messeinrichtungen werden grundsätzlich vom Netzbetreiber gestellt, eingebaut und unterhalten und stehen in dessen Eigentum. Der Einspeiser ist zur Zahlung eines Entgeltes für die Nutzung der Messeinrichtungen verpflichtet.

Zusätzlich zu den genannten Regelungen gilt die Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Elektrizitätsversorgung von Tarifkunden (AVBEltV) vom 21. Juni 1979, die als Anlage 3 zum Stromeinspeisungsvertrag ebenfalls im Anhang dieses Berichts zu finden ist. Die Inhalte dieser Verordnung beschreiben die für alle als Tarifkunden versorgten Abnehmer elektrischer Energie geltenden Regeln (z. B. zu Versorgungsunterbrechungen, d.h. Trennungen vom Netz) und beinhalten keine darüber hinausgehenden eigene Regelungen für Betreiber von KWK-DEA.

7.5.2 Besonderheiten bei gesteuerter Einspeisung

Da im Zuge der Liberalisierung der Strommärkte der Netzbetrieb vom Stromhandel organisatorisch zu trennen ist, nimmt der Netzbetreiber grundsätzlich keinen Einfluss auf die Betriebsweisen (Betriebszeiten und –frequenzen) von DEA, sofern diese nicht den sicheren und störungsfreien Netzbetrieb gefährden. Deshalb unterscheidet der Netzbetreiber im Stromeinspeisungsvertrag auch nicht zwischen wärmegeführtem oder nach anderen (wirtschaftlichen) Gesichtspunkten optimiertem Betrieb.

Es gelten somit seitens des Netzbetreibers die gleichen Regelungen wie unter Abschnitt 7.5.1 genannt, die er mit dem Einspeiser, d. h. dem Betreiber der KWK-Anlage vereinbart. Dabei muss der Einspeiser nicht mit dem Gebäudebesitzer identisch sein, sondern kann eine andere Person oder Gesellschaft sein. In diesem Fall würde ein weiterer Vertrag zwischen KWK-DEA-Betreiber und Hausbesitzer die Betriebsweise bzw. die Heizwärmebelieferung regeln.

Für den Sonderfall, dass der Netzbetreiber selbst als Betreiber einer KWK-DEA auftritt, wäre gegebenenfalls zwischen dem Netzbetreiber und dem Gebäude- bzw. Grundstückseigner ein Vertrag zur Nutzung des Grundstücks bzw. zur Regelung des Zugangs zu schließen. Ein solcher „Vertrag zur beschränkten persönlichen Dienstbarkeit“ ist als Mustervertrag der HSE HEAG Südhessische Energie AG ebenfalls im Anhang (Abschnitt 11.4) zu finden.

8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

8.1 Investitionskosten, Strom- und Erdgaspreise, Einspeisevergütung

Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit muss prinzipiell zwischen den möglichen Ausführungsvarianten von KWK-DEA unterschieden werden. Im folgenden sollen sich die Betrachtungen auf solche KWK-DEA fokussieren, die auf der Basis von Brennstoffzellen aufgebaut sind.

Die Wirtschaftlichkeit einer Brennstoffzellenanlage wird wesentlich durch die Höhe der Investitionskosten bestimmt, die mit denen der konventionellen Versorgung verglichen werden müssen. Bei sonst gleichen Rahmenbedingungen, insbesondere was die Preise für Strom und Erdgas betrifft, wird die Wirtschaftlichkeit am schnellsten bei niedrigen zusätzlichen Investitionskosten erreicht. Diese setzen sich aus dem Preis für die Anlage, für die Peripheriegeräte und der Montage zusammen. In [11] werden wegen der nicht gegebenen Voraussagbarkeit der erforderlichen Investitionskosten verschiedene Szenarien definiert.

Das Trendszenario berücksichtigt die zum Zeitpunkt der Prognosen (2000) wahrscheinlichsten Annahmen. Demnach liegen die erwarteten zusätzlichen Investitionskosten bei Erreichen der technischen Marktreife

- für ein Einfamilienhaus bei 3.580 €,
- für ein Zweifamilienhaus bei 4.090 €,
- bei einem Mehrfamilienhaus bei etwa 6.700 €.

Hier wurden die Kosten für die konventionelle Heizanlage bereits abgezogen. Zu beachten ist, dass die dieser Schätzung zugrunde gelegte elektrische Bemessungsleistungen der Anlagen wesentlich geringer sind als die in der vorliegenden Studie benutzten Annahmen. So wurde für ein Einfamilienhaus eine elektrische Bemessungsleistung der Brennstoffzellenanlage von 1 kW, bei einem Zweifamilienhaus von 1,5 kW (in der vorliegenden Studie jeweils 2,9 kW) und bei einem Mehrfamilienhaus von 3,5 kW (hier: durchschnittlich 9,1 kW) angenommen. Diese Annahmen basieren auf der dort getroffenen Maßgabe, die Stromerzeugung praktisch ausschließlich zur Deckung des Eigenbedarfs vorzunehmen.

Derzeit sind keine verlässlicheren Daten für die zu erwartenden Anlagenpreise verfügbar. Insbesondere für die hier betrachteten kleineren Anlagen bis zu einer elektrischen Bemessungsleistung von 3,5 kW gibt es bisher keine Modelle, die die technische Marktreife erreicht haben, so dass Vergleichswerte zur Verifizierung der Schätzungen fehlen. Auch für mittelgroße Anlagen (Mehrfamilienhäuser) sind bisher nur Prototypen verfügbar, so dass noch keine konkreteren Preise genannt werden können, da sich die Herstellungskosten bis zur Einführung der Serienproduktion wahrscheinlich nochmals verringern werden.

Zu beachten ist bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen aus der Sicht des Betreibers, ob und in welcher Höhe eine öffentliche Subvention der Investitionskosten für Brennstoffzellenanlagen

stattfindet. In [11] wurde für das Trendszenario angenommen, dass 10% der Mehrkosten gegenüber einem vergleichbaren konventionellen Wärmeerzeuger als Zuschuss öffentlich finanziert werden.

Ebenso wie die Investitionskosten sind die Betriebskosten und die Betriebserlöse in Form vermiedener Strombezugskosten zu betrachten. Daher ist auch die Entwicklung der Strompreise eine wesentliche Bestimmungsgröße für die Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellenanlagen.

In [11] wird für den Bruttopreis des Strombezugs angenommen, dass dieser ausgehend von einem Niveau von 13 ct/kWh in 2000 auf rund 15 ct/kWh in 2015 ansteigt, um danach konstant zu bleiben (Trendszenario). Aufgrund der zusätzlichen wachsenden steuerlichen Belastungen und der Umlage der Finanzierung regenerativer Erzeugung gemäß EEG zeichnet sich derzeit ein stärker ansteigender Strompreis ab, der eine höhere Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellen bewirken würde.

Als weiterer Schlüsselfaktor hat der Erdgaspreis einen hohen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und damit auf die Markteindringung von Brennstoffzellenanlagen. In [11] wird davon ausgegangen, dass im Betrachtungszeitraum bis 2040 keine Verknappung eintritt, die zu einem Preisanstieg für Erdgas führt. Berücksichtigt wurde auch die Kopplung der Preise von Erdöl und Erdgas. Hierauf wurde das Trendszenario mit einem über den Betrachtungszeitraum hinweg gleichbleibenden Erdgaspreis aufgebaut. Als weitere Randbedingungen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von Brennstoffzellenanlagen wurde in [11] die durch die Ökosteuern bedingte steuerliche Belastung auch zukünftig als konstant angenommen sowie eine Steuerbefreiung für das in Brennstoffzellenanlagen eingesetzte Erdgas bis ins Jahr 2010 vorausgesetzt. Die nicht vorhersagbare Entwicklung der Preise für Rohöl, die durch Währungsschwankungen verursachten Einflüsse, vor allem aber der erhebliche Einfluss der steuerlichen Belastung bzw. Entlastung machen präzisere Vorhersagen nicht möglich.

Wird durch die Brennstoffzellenanlage mehr Strom erzeugt als für den Eigenbedarf im gleichen Gebäude erforderlich, so gewinnt auch die Höhe der Vergütung einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Für aus KWK-Anlagen eingespeiste Energie zahlt z. B. die HSE HEAG Südthessische Energie AG derzeit (Stand 1.4.2003) bei Einspeiseleistungen von bis zu 30 kW in das Niederspannungsnetz einen Arbeitspreis von 2,1 ct/kWh zuzüglich einen Abschlag für vermiedene Netzkosten von 0,17 ct/kWh. Hinzu kommt der im KWK-Gesetz [1] für die ersten zehn Jahre nach Inbetriebnahme garantierte Zuschlag in Höhe von 5,11 ct/kWh für Einspeisungen von Brennstoffzellenanlagen. Dies ergibt im betrachteten Netzgebiet eine Gesamtvergütung von 7,38 ct/kWh für Einspeisungen aus Brennstoffzellenanlagen. Dies liegt unterhalb der Kosten für den vermiedenen Strombezug, so dass die Einspeisung elektrischer Energie weniger wirtschaftlich ist als die Vermeidung von Strombezug.

Da alle genannten Einflussgrößen für die Wirtschaftlichkeit erhebliche Prognoseungenauigkeiten aufweisen, ist eine klare und eindeutige Bewertung nicht möglich. Stattdessen wurden in [11] neben dem Trendszenario zwei weitere Szenarien mit modifizierten Annah-

men definiert. Das Szenario BZplus berücksichtigt günstigere Bedingungen für die Wirtschaftlichkeit als die genannten Bedingungen (d.h. geringere Investitionskosten und/oder höhere Subventionen, höhere Strompreise, geringere Erdgaspreise bzw. höhere oder längere steuerliche Entlastung für Erdgas in Brennstoffzellenanlagen), das Szenario BZminus berücksichtigt umgekehrt ungünstigere Bedingungen.

Unberücksichtigt blieb bisher die Frage, ob KWK-DEA, also auch Brennstoffzellenanlagen, Systemdienstleistungen in Form von Darbietung von Regelleistung erbringen können und ob hierdurch die Wirtschaftlichkeit der Anlagen erhöht bzw. erreicht werden kann. Dies soll im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

8.2 Darbietung von Regelleistung

Angesichts der auch zukünftig vergleichsweise relativ hohen spezifischen Kosten für KWK-DEA (z. B. auf Brennstoffzellenbasis) ist nicht zu erwarten, dass eventuelle zusätzliche Erlöse für nur kurzzeitig geregelt oder gesteuert in das Verteilnetz eingespeiste elektrische Leistung eine solche Höhe erreichen, dass eine größere Auslegung der Anlagen als für diese Studie angenommen wirtschaftlich wird. Somit verbleibt nur in den Übergangsjahreszeiten (und in sehr geringem Umfang im Sommer) die Möglichkeit einer gezielten Steuerung oder Regelung der Leistungsabgabe.

Eine erhöhte Vergütung einer Einspeisung zu vorgegebenen Zeiten muss so bemessen sein, dass sie einerseits dem Betreiber der KWK-DEA so hohe Zusatzeinnahmen verspricht, dass dieser geeignete Vorrichtungen zur zeitlichen Steuerung/Limitierung des Betriebs vorsieht, andererseits gering genug sein, dass der Vergütende noch einen finanziellen Gewinn aus dem Verkauf der Leistung bzw. dem nicht ausgeführten Kauf anderweitig verfügbarer Regelleistung erwarten kann.

Die Wirtschaftlichkeit der Höhervergütung der Einspeisung unter den genannten Bedingungen ist nur unter folgenden Voraussetzungen gegeben:

- Existenz kostengünstiger Verfahren zur Regelung/Steuerung der Leistungsabgabe
- hohe Vergütungen für Regelleistung, die nur jahreszeitlich, abhängig vom Klima, verfügbar ist
- Existenz einer entsprechend großen Summenleistung, die den Aufwand zur Regelung/Steuerung rechtfertigt.

Während die ersten beiden der genannten Punkte unter optimistischen Annahmen für die Rahmenbedingungen, d. h. günstige Kostenentwicklungen für geeignete Kommunikationstechnik bzw. -verfahren und allgemein deutliche Verteuerung der Regelleistung am Markt, möglicherweise zukünftig gegeben sein könnten, beinhaltet die dritte Bedingung einen Widerspruch zur Fragestellung: die Installation einer großen Anzahl von KWK-DEA mit entsprechend großer elektrischer Summenleistung wird nur dann erfolgen, wenn die Wirtschaftlichkeit aus der Sicht der Betreiber schon vorher (ohne das Erwirtschaften zusätzlicher Erlöse durch Erbringen von Systemdienstleistungen) gegeben ist. Ein zusätzlicher wirt-

schaftlicher Anschub zur Einführung einer flächendeckenden Installation von KWK-DEA durch den Verkauf von Regelleistung kann daher nicht erwartet werden.

Auch wenn sich eine Wirtschaftlichkeit des Betriebs von KWK-DEA schon vor dem Verkauf von Regelleistung einstellt und es zu einer flächendeckenden Installation entsprechender Anlagen in einem geeigneten Umfang kommt, ist es sehr fraglich, ob dann der Großteil der in KWK-DEA installierten Leistung wirtschaftlich für eine Regelung/ Steuerung der Leistungsabgabe erschlossen werden kann. Hierfür müssten nachträglich Modifikationen an der Steuerung der KWK-DEA vorgenommen werden, die hinsichtlich des geringen zu erwartenden Mehrerlöses für die Mehrzahl der Anlagen kaum wirtschaftlich wären. Wie gering der Umfang der pro Anlage verfügbaren Regelenergie und damit der verbundene potenzielle Mehrerlös für den Betreiber ist, mag folgende Betrachtung verdeutlichen:

Nach den Ergebnissen der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Potenzialschätzung (siehe Abschnitt 4.6) entfällt ein Großteil des Potenzials für KWK-DEA, mit mehr als 85 Prozent der Anlagen und rund der Hälfte der installierten elektrischen Leistung, auf Ein- bis Dreifamilienhäuser. Selbst wenn die dort installierten KWK-DEA die in dieser Studie relativ hoch angenommene durchschnittliche elektrische Bemessungsleistung von 2,9 kW aufweisen würden, würde die jährlich gewandelte Energiemenge bei einer durchschnittlich erreichten äquivalenten Nutzungsdauer der Volllast von 5.000 Stunden pro Jahr nur 14.500 kWh betragen.

Bei der simulierten Betriebsweise würde rund 2/3 der abgegebenen elektrischen Energie im Winter erzeugt, wenn Dauerbetrieb der Anlagen vorliegt. Da während dieser Zeit keine Regelung oder Steuerung der elektrischen Leistungsabgabe möglich ist, würden gesonderte Einspeisetarife sinnvollerweise nur während der anderen Jahreszeiten gelten, bzw. so gestaltet werden, dass bei Dauerbetrieb in der Summe keine erhöhten Erlöse gegenüber den allgemein gültigen erzielt werden können (d. h. Kompensation durch geringere Erlöse während Schwachlastzeiten). Somit steht aus Betreibersicht weniger als 1/3 der erzeugten elektrischen Energie für zusätzliche Erlöse zur Verfügung, das sind weniger als 5.000 kWh pro Jahr. Bei einer Zusatzvergütung von beispielsweise 2 ct/kWh gegenüber dem „normalen“ Einspeisetarif, die z. B. in einer zeitabhängigen Tarifstruktur berücksichtigt werden kann, sind die potenzielle Mehrerlöse auf maximal 100 € pro Jahr begrenzt (wenn das gesamte verfügbare Potenzial als Regelenergie zum Maximaltarif eingespeist werden kann). Hiervon sind die zusätzlichen Kosten für eine erforderliche Steuereinrichtung und die Zusatzmiete für den Mehrtarifzähler abzuziehen, so dass eine Wirtschaftlichkeit, wenn überhaupt, nur knapp zu erreichen ist.

Daher ist anzunehmen, dass eine Leistungsregelung von KWK-DEA zur Bereitstellung von Ausgleichs- oder Regelenergie auch zukünftig wohl nur für größere Anlagen wirtschaftlich sein kann, z.B. für die Hausenergieversorgung von großen Gebäuden mit vielen Wohn- und/oder Gewerbeeinheiten oder für Anlagen zur Nahwärmeversorgung von Neubaugebieten. Hier ist Aufwand für eine Regelung/Steuerung bezogen auf die verfügbare Leistung und somit auch die eingespeiste Energie wesentlich günstiger.

8.3 Prognostiziertes Marktvolumen

Wie bereits im Abschnitt 4.1 ausgeführt, ist das Marktvolumen durch die realisierte bzw. prognostizierte Absatzmenge an Anlagen beschrieben. Neben Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit spielt hier auch die Akzeptanz einer Technik eine zusätzliche Rolle.

Da sich für die nähere Zukunft keine zusätzliche Wirtschaftlichkeit aus dem Dargebot von Regelleistung erwarten lässt (siehe Abschnitt 8.2), sind die in Abschnitt 8.1 aus [11] entnommenen Parameter für die Ermittlung des wirtschaftlichen Potenzials wesentlich, aus dem dann die Prognose für das Marktvolumen abgeleitet werden kann.

In [11] wird eine Gesamtbetrachtung für das Marktvolumen für Brennstoffzellenanlagen zur Hausenergieversorgung mit den in Abschnitt 8.1 beschriebenen elektrischen Bemessungsdaten für die Jahre 2000 bis 2025 wiedergegeben. Da keine präzisere Quantifizierung der das Marktvolumen beeinflussenden Parameter und auch keine über die dort genannten Größen hinausgehenden Faktoren ermittelt werden konnten, sollen im folgenden die dort genannten Ergebnisse kurz dargestellt werden.

Gemäß dem Trendszenario aus [11] ergibt sich bundesweit im Jahr 2010 ein Marktvolumen von etwa 55.000 Brennstoffzellenanlagen der genannten Größe. Zwischen 2011 und 2016 steigt das Marktvolumen auf jährlich bis zu rund 110.000 Anlagen an und geht anschließend aufgrund des geringer werdenden Neuanlagenbedarfes wieder auf 85.000 Anlagen im Jahr 2025 zurück.

Das kumulierte Marktvolumen für den in der vorliegenden Studie betrachteten Prognosezeitpunkt 2023 wird demnach auf etwa 1,6 Millionen Anlagen bundesweit geschätzt. Die große Unsicherheit aus der Unschärfe der zu berücksichtigenden essentiellen Einflussfaktoren drückt sich in den differierenden Vergleichszahlen der Alternativszenarien aus: Im pessimistischen Szenario BZminus erreicht das kumulierte Marktvolumen in 2023 gerade noch 250.000 Brennstoffzellenanlagen, im optimistischen BZplus-Szenario hingegen 4,5 Millionen Anlagen. Während sich im BZminus- und Trendszenario die Anzahl der Anlagen in Ein- bis Zweifamilienhäusern einerseits und Mehrfamilienhäusern andererseits in etwa die Waage hält, ist beim BZplus-Szenario die Anzahl der kleineren, in Ein- und Zweifamilienhäusern installierten Anlagen mit rund 3,2 Millionen mehr als doppelt so hoch wie die der Anlagen in Mehrfamilienhäusern (1,3 Millionen). Dies verdeutlicht, dass insbesondere die Marktdurchdringung mit kleineren Einheiten nur bei günstigen wirtschaftlichen Bedingungen flächendeckend zu erwarten ist.

Gemäß den in [11] getroffenen Annahmen wird bis zum Jahr 2025 im Trendszenario ein Anteil der installierten Brennstoffzellenanlagen am kumulierten Neuanlagenbedarf von gut 20% erreicht. Da der Neuanlagenbedarf bei dem betrachteten 20-Jahre-Prognosezeitraum praktisch gleich dem technischen Potenzial ist, sind die in der vorliegenden Studie benutzte Vergleichsrechnungen mit einer Umsetzung von 20% des technischen Potenzials bis zum Jahr 2023 prinzipiell durchaus als realistisch anzusehen. Allerdings muss beachtet werden, dass die in [11] angenommenen Anlagengrößen wesentlich kleiner sind als jene in dieser

Studie. Die gemäß dem Trendszenario in [11] prognostizierte installierte elektrische Leistung beträgt durchschnittlich nur 2,4 kW je Anlage, während die vorliegende Studie von einer durchschnittlichen elektrischen Bemessungsleistung der KWK-DEA in Wohngebäuden von 3,7 kW ausgeht. Andererseits berücksichtigt [11] nur KWK-DEA auf Brennstoffzellenbasis, weitere Ausführungsformen wie Gasmotor-BHKW und Mikro-Gasturbinen und deren mögliche (zusätzliche) Marktvolumina wurden nicht berücksichtigt.

Zu bedenken ist schließlich die große Streuung der Prognosen (nur 3,2% des Neuanlagenbedarfs im BZminus-, aber mehr als 50% des Neuanlagenbedarfs im BZplus-Szenario werden durch Brennstoffzellenanlagen umgesetzt) und die damit verbundene Unsicherheit. Jedoch variiert die gesamte, am Netz installierte elektrische Leistung nicht ganz so stark: Beim optimistischeren BZplus-Szenario ist die durchschnittliche Anlagengröße wegen des höheren Anteils kleinerer Anlagen (s. o.) noch kleiner und beträgt nur 1,9 kW (elektrische Bemessungsleistung). Die sich ergebende resultierende elektrische Summenleistung ist damit nur unwesentlich höher als bei dem in den Abschnitten 5 und 6 des vorliegenden Berichts verwandten 20%-Szenario.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass die in dieser Studie durchgeführten Untersuchungen mit der Annahme einer Umsetzung von 20% des ermittelten technischen Potenzials für KWK-DEA und den getroffenen, für die möglichen Rückwirkungen ungünstigen Annahmen (hohe Bemessungsleistungen der Anlagen) die maximalen, unter dem derzeitigen Kenntnisstand zu erwartenden Rückwirkungen auf das Verteilnetz korrekt beschreiben.

Das Erreichen der Wirtschaftlichkeit aus der Sicht des Betreibers ist insbesondere für die größeren der betrachteten Anlagen (Mehrfamilienhäuser) unter günstigen Bedingungen durchaus realistisch anzunehmen. Bei der Frage nach einer Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch Beteiligung der KWK-DEA am Regelleistungsmarkt bleibt die Entwicklung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und damit der Marktdurchdringung zunächst abzuwarten. Erst dann und unter sehr günstigen Kosten- und Erlösbedingungen (niedrige Kommunikationskosten, hoher Bedarf bzw. Preis für Regelenergie) kann sich für KWK-DEA, zumindest für die größeren der betrachteten Anlagen (z. B. ab etwa 50 kW installierter elektrischer Leistung) eine Regel- bzw. Steuerbarkeit wirtschaftlich rechnen.

Grundsätzlich ist für Neubaugebiete zu prüfen, ob eine Nahwärmeversorgung aus zentralen, größeren KWK-Anlagen die wirtschaftlich wesentlich günstigere Variante darstellt. Bei solchen Anlagen ist auch ein zentrales Lastmanagement effizienter realisierbar.

9 Fazit

Durch die im Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz [1] garantierte Einspeisevergütung bei dezentraler Energieumwandlung mit KWK-Anlagen, und wegen der zusätzlichen Zuschlags bei der Vergütung von Einspeisungen aus Brennstoffzellenanlagen, ist mit einer Zunahme kleiner, wärmegeführter Erzeugungsanlagen in den kommenden Jahren zu rechnen. Ein denkbarer, flächendeckender Einsatz von KWK-DEA kann Auswirkungen auf die Planung und den Betrieb der elektrischen Energieversorgungsnetze haben und lokal zeitweise die bisherige Top-Down-Versorgung umkehren.

Zur Abschätzung des technischen Potenzials wurde der Gebäudebestand eines realen Netzgebietes erfasst und für einen Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2023 die Entwicklung der für die Auslegung potenzieller KWK-DEA entscheidenden Parameter abgeschätzt. Die Stromkennzahl der KWK-DEA, d.h. das Verhältnis der abgegebenen elektrischen Leistung zur abgegebenen thermischen Leistung dieser Anlagen, wurde für die Zukunft mit mindestens 0,8 abgeschätzt. Ferner wurde angenommen, dass alle KWK-DEA über einen thermischen Speicher verfügen, der einen Ausgleich der tageszeitlichen Schwankungen des Wärmebedarfs erlaubt und so zu einer wesentlich erhöhten Nutzung der Anlagen führt.

Unter diesen Bedingungen konnte nachgewiesen werden, dass das technische Potenzial der durch KWK-DEA installierten elektrischen Leistung unter Einbeziehung der Gewerbebetriebe auch für ein größeres Netzgebiet durchaus in der Größe der heutigen elektrischen Spitzenlast liegen kann. Abschätzungen für ein reales Niederspannungs- und ein reales Mittelspannungsnetzgebiet zeigten, dass in Regionen mit durchgängiger Verfügbarkeit von Erdgas (vorhandenes Gasleitungsnetz) die installierte elektrische Leistung bei voller Umsetzung des technischen Potenzials sogar wesentlich höher werden kann.

Da der Heizwärmebedarf von Gebäuden jahreszeitlich sehr viel stärker variiert als der Bedarf an elektrischer Energie, zeigen Simulationen der Lastflüsse im elektrischen Verteilnetz unter Berücksichtigung der potenziellen Einspeisung aus wärmegeführten KWK-DEA deutliche Unterschiede abhängig von der betrachteten Jahreszeit. Untersuchungen mit dem BHKW-Planungs- und Projektierungsprogramm BHKW-Plan [13] zeigten, dass die KWK-DEA bei geeigneter Auslegung in den Wintermonaten praktisch dauerhaft mit Bemessungsleistung, in der Übergangszeit vorwiegend im Teillastbereich und in den Sommermonaten nur etwa eine Stunde am Tag betrieben werden. Hieraus ergibt sich eine jährliche äquivalente Nutzungsdauer ihrer Bemessungsleistung von rund 5.000 Stunden.

Zur Betrachtung potenzieller Auswirkungen durch die Einspeisung aus KWK-DEA wurden Lastfluss- und Kurzschlussstrom-Berechnungen ausgeführt, bei denen von einer durchschnittlichen Ausschöpfung von 100% (worst-case-Betrachtungen) und 20% des technischen Potenzials (realistische Prognose bei günstigen wirtschaftlichen Voraussetzungen) ausgegangen wurde. Unter letztgenannten Umständen ergibt sich am Tage zwischen etwa 6:00 Uhr und 22:00 Uhr keine Umkehr des Lastflusses, sondern lediglich eine Reduzierung des Leistungsbezugs aus dem überlagerten Netz. Lediglich in den Nachtstunden erfolgt im Winter, wegen der praktisch konstanten Einspeisung elektrischer Leistung durch die KWK-

DEA, eine Rückspeisung in die überlagerte Netzebene. Dieses führte in den untersuchten Netzen im 20%-Szenario nicht zu einer erhöhten Betriebsmittelauslastung.

Zu beachten ist, dass unter den getroffenen Annahmen an einem Wintertag keine Möglichkeit einer Ausregelung der Leistungsschwankungen durch die KWK-DEA unter Zuhilfenahme der thermischen Speicher besteht, da die Anlagen, wie schon ausgeführt, zu dieser Jahreszeit über den gesamten Tagesverlauf praktisch konstant mit ihrer vollen Bemessungsleistung betrieben werden.

Eine Beteiligung der installierten KWK-DEA an einer Ausregelung von Leistungsschwankungen ist daher nur möglich, wenn diese mehrheitlich im Teillastbereich betrieben werden. Dies trifft vor allem für Tage in den Übergangsjahreszeiten zu, d.h. im Frühjahr und im Herbst. Die Möglichkeit eines externen Zugriffs auf die KWK-DEA erlaubt grundsätzlich, anstelle der stochastisch verteilten Einspeisung unter Nutzung der vorhandenen thermischen Speicher den Leistungsbezug aus dem Hochspannungsnetz zu begrenzen, ohne die Betriebsstundenzahl der KWK-DEA zu verändern (d.h. ohne Änderung ihres Beitrags zur Heizwärmeversorgung und ihrer elektrischen Energieeinspeisung).

Da die Installation einer ausreichend großen Anzahl von KWK-DEA mit entsprechend großer elektrischer Summenleistung für eine wirtschaftliche Leistungsregelung oder –steuerung nur dann erreicht werden kann, wenn die Wirtschaftlichkeit aus der Sicht der Betreiber schon ohne zusätzliche Erlöse gegeben ist, ist ein zusätzlicher wirtschaftlicher Anreiz zur Einführung einer flächendeckenden Installation von KWK-DEA durch den Verkauf von Regelleistung jedoch nicht zu erwarten.

Betrachtungen zum Niveau der Kurzschlussströme beim angenommenen flächendeckenden Einsatz von KWK-DEA zeigen, dass kein wesentlicher Anstieg zu erwarten ist, wenn die überwiegende Anzahl der Anlagen, wie dies z.B. bei Brennstoffzellenanlagen der Fall sein würde, über Umrichter an das Niederspannungsnetz angeschlossen werden. Auch erlauben moderne Umrichter selbst bei einer hohen Zahl von angeschlossenen Anlagen einen Betrieb ohne eine unzulässige Beeinträchtigung der Spannungsqualität.

Hingegen sind bei zunehmender Einspeisung durch KWK-DEA die Schutzkonzepte im Verteilnetz zu überprüfen, um den Anforderungen einer mehrseitigen Einspeisung und lokal möglichen, zeitweisen Rückspeisungen in das überlagerte Netz gerecht zu werden und eine selektive Ausschaltung fehlerbetroffener Netzbereiche zu gewährleisten.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und das prognostizierte Marktvolumen in [11] belegen, dass die in dieser Studie durchgeführten Untersuchungen mit der Annahme einer Umsetzung von 20% des ermittelten technischen Potenzials für KWK-DEA und den getroffenen, für die möglichen Rückwirkungen ungünstigen Annahmen (hohe Bemessungsleistungen der Anlagen) die maximalen, unter dem derzeitigen Kenntnisstand zu erwartenden Rückwirkungen auf das Verteilnetz korrekt beschreiben.

Das Erreichen der Wirtschaftlichkeit aus der Sicht des Betreibers ist insbesondere für die größeren der betrachteten Anlagen (Mehrfamilienhäuser) unter günstigen Bedingungen als durchaus realistisch anzunehmen. Bei der Frage nach einer Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch Beteiligung der KWK-DEA am Regelleistungsmarkt bleibt die Entwicklung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und damit der Marktdurchdringung zunächst abzuwarten.

Grundsätzlich ist für Neubaugebiete zu prüfen, ob eine Nahwärmeversorgung aus zentralen, größeren KWK-Anlagen die wirtschaftlich wesentlich günstigere Variante darstellt.

10 Literatur

- [1] Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz, KWKG). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2002 Teil I Nr. 19, ausgegeben zu Bonn am 22. März 2002.
- [2] Gesetz über die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien in das öffentliche Netz (Stromeinspeisungsgesetz) vom 7. Dezember 1990. BGBl I S. 2633, BGBl III 754-9
- [3] Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG) sowie zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes vom 29. März 2000. BGBl Jg. 2000 Teil I Nr. 13, Bonn: 31.3.2000
- [4] Verband der Elektrizitätswirtschaft (VDEW). www.strom.de
- [5] VDEW: 40 Prozent mehr Blockheizkraftwerke. Ergebnisse einer VDEW-Erhebung, veröffentlicht am 6.12.1999 im Internet: www.strom.de
- [6] Gesetz zum Schutz der Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz) vom 12. Mai 2000. BGBl Jg. 2000 Teil I Nr. 22, Bonn: 17.5.2000
- [7] VDEW: Elektrizitätserzeugung 2002. Industrie und Private liefern mehr Strom. VDEW-Mitteilung, veröffentlicht am 31.3.2003. www.strom.de
- [8] Brennstoffzelle als Heizgerät? – Vaillant will 2001 einen Feldversuch starten. Elektrizitätswirtschaft 99 (2000), Heft 24, S. 72
- [9] VDEW: Eigenerzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz. Richtlinie für den Anschluß und Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz. 2. Ausgabe 1998, VDEW Energieverlag GmbH.
- [10] VDEW: Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz. Richtlinie für den Anschluß und Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz. 4. Ausgabe 2001, VDEW Energieverlag GmbH.
- [11] Krammer, Th.: Brennstoffzellenanlage in der Hausenergieversorgung. Instrumentarien zur Potenzialanalyse. IfE Schriftenreihe, Band 44. E&M Energie und Management Verlagsgesellschaft mbH, Herrsching, 1. Auflage 2001
- [12] Hessisches Statistisches Landesamt – www.hsl.de
- [13] Software BHKW-Plan für die Auslegung und Wirtschaftlichkeitsberechnung von Blockheizkraftwerken. www.bhkw-info.de
- [14] Statistisches Bundesamt Deutschland. - www.destatis.de

- [15] DIN IEC 60038 (VDE 0175): IEC-Normspannungen. November 2000
- [16] DIN EN 50160: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen. März 2000
- [17] Perspektiven einer Wasserstoff-Energiewirtschaft – Teil 3: Das Virtuelle Brennstoffzellen-Kraftwerk. Technische und energiewirtschaftliche Bewertung. E&M Energie und Management Verlagsgesellschaft mbH, Herrsching, 1. Auflage 2002
- [18] DIN EN 60909-0 (VDE 0102): Kurzschlussströme in Drehstromnetzen, Teil 0: Berechnung der Ströme. Juli 2002
- [19] DIN EN 60034-1 (VDE 0530 Teil 1): Drehende elektrische Maschinen, Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten. September 1995
- [20] Entwurf DIN VDE 0126 (VDE 0126): Selbsttätige Freischaltstelle für Photovoltaikanlagen einer Nennleistung $\leq 4,6$ kVA und einphasiger Paralleleinspeisung über Wechselrichter in das Netz der öffentlichen Versorgung. April 1999-04
- [21] Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik (BGFE) – BGV A2: Unfallverhütungsvorschrift Elektrische Anlagen und Betriebsmittel. Internetpublikation www.bgfe.de, 1998
- [22] DIN VDE 0105-100 (VDE 0105 Teil 100): Betrieb von elektrischen Anlagen. Juni 2000
- [23] Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik (BGFE) - BGI 519: Sicherheit beim Arbeiten an elektrischen Anlagen. Internetpublikation www.recht.com, Mai 2000
- [24] Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik (BGFE) - BGI 548: Sicherheitslehrbrief für Elektrofachkräfte, Internetpublikation www.recht.com, 2000
- [25] Verhoeven, B.; Collison, A.; Brower, W.; Thornycroft, J.: Probability and Risk Assessment of Islanding of Grid-Connected PV-Inverters. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 05/2003, Glasgow, UK
- [26] Köln, W.-K.: Die ENS wird europatauglich. Mitteilung Fa. UfeGmbH, www.ufegmbh.de
- [27] Krampitz, I.: BISI statt ENS, erste Ergebnisse des Forschungsprojektes Siden a zur Netzüberwachung. Photon 05/2003, S. 68ff
- [28] Woyte, A.; Bemans, R.; Nijs, H.; Heskes, P.; Phlippen, F: Netzüberwachung und Schutzfunktionen im europäischen Zusammenhang.
- [29] Krampitz, I.: ENS am Ende? Photon 10/2003, S. 90

11 Anhang

11.1 Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

f_{red}	Reduktionsfaktor der Netzkurzschlussleistung durch umrichterbasierte DEA.
I_k''	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom
I_N	Nennstrom
i_p	Stoßstrom
κ	Stoßfaktor

Abkürzungen

AuS	Arbeiten unter Spannung
BGI	Berufgenossenschaftliche Information
BGV	Berufgenossenschaftliche Verordnung
BHKW	Blockheizkraftwerk
DEA	Dezentrale Energieerzeugungsanlage
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWK-DEA	Dezentrale Energieerzeugungsanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplungseigenschaften
ONS	Ortsnetzstation
SLP	Standardlastprofil
UA	Umspannanlage
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik, ihrer Wissenschaften und der darauf aufbauenden Technologien und Anwendungen
VPE	Vernetztes Polyethylen

11.2 Liste der Ortsnetzstationen in der Mittelspannung

Lfd. Nr.	Mittlere installierte Leistung [MW]	Last- und Einspeisetyp
1	0,1	Wohngebiet
2	0,1	Wohngebiet
3	0,252	Wohngebiet
4	0,158	Wohngebiet
5	0,158	Wohngebiet
6	0,158	Wohngebiet
7	0,158	Wohngebiet
8	0,063	Wohngebiet
9	0,252	Wohngebiet
10	0,159	Wohngebiet
11	0,252	Wohngebiet
12	0	<i>nicht repräsentativ für Wohn-/Industriegebiete, vernachlässigt</i>
13	0	<i>nicht repräsentativ für Wohn-/Industriegebiete, vernachlässigt</i>
14	0,039	G1
15	0,252	Wohngebiet
16	0,252	G4
17	2,737	Wohngebiet
18	2,667	Wohngebiet
19	0,624	Wohngebiet
20	0,158	Wohngebiet
21	0,158	Wohngebiet
22	0,064	G1
23	0,158	Wohngebiet
24	0,252	Wohngebiet
25	0,4	Wohngebiet
26	0,158	Wohngebiet

Lfd. Nr.	Mittlere installierte Leistung [MW]	Last- und Einspeisetyp
27	0,252	Wohngebiet
28	0,504	G1
29	0,252	G1
30	0,4	G1
31	0,064	G4
32	0	G1
33	0,252	Wohngebiet
34	0,158	Wohngebiet
35	0,158	Wohngebiet
36	0,252	G3
37	0,158	Wohngebiet
38	0,252	G1
39	0,158	G4
40	0,158	Wohngebiet
41	0,504	G1
42	0,252	Wohngebiet
43	0,252	Wohngebiet
44	0,158	Wohngebiet
45	0	<i>T-Abzweig, vernachlässigt</i>
46	0	<i>T-Abzweig, vernachlässigt</i>
47	0,4	G1
48	0,399	Wohngebiet
49	0,252	G1
50	0,158	G1
51	0,158	Wohngebiet
52	0,252	G1
53	0,158	Wohngebiet
54	0,252	Wohngebiet
55	0,099	G1

Lfd. Nr.	Mittlere installierte Leistung [MW]	Last- und Einspeisetyp
56	0,158	G4
57	0,252	Wohngebiet
58	0,252	Wohngebiet
59	0,064	G1
60	0,099	Wohngebiet
61	0,158	Wohngebiet
62	0,252	Wohngebiet
63	0,159	Wohngebiet
64	0,252	Wohngebiet
65	0,158	G4
66	0,252	Wohngebiet
67	0,159	Wohngebiet
68	0	Wohngebiet
69	0,018	Wohngebiet
70	0,158	Wohngebiet
71	0,252	G4
72	0,252	Wohngebiet
73	0,159	Wohngebiet
74	0,251	Wohngebiet
75	0,252	G3
76	0,8	G3
77	0,252	Wohngebiet
78	0,158	Wohngebiet
79	0	G4
80	0,158	Wohngebiet

11.3 Mustervertrag KWK-Stromeinspeisung

11.4 Mustervertrag zur beschränkten persönlichen Dienstbarkeit