

# LEISTUNGSGRENZEN IN VERTEILNETZEN UND KAPAZITÄTEN FÜR ELEKTRIFIZIERTE WÄRMETECHNOLOGIEN

Hann RUPPERT, Simon BRENNER, Prof. Dr. Klaus-Martin GRAF

Hochschule Darmstadt – Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Birkenweg 8-10 D- 64295 Darmstadt, +49(0)6151/16-37792, hann.ruppert@h-da.de, [www.h-da.de](http://www.h-da.de)

**Kurzfassung:** Eine erfolgreiche Energiewende bedingt auch eine Wärmewende und die Kopplung der Sektoren Strom und Wärme. Um hohe Anteile erneuerbarer Energien auch für die Wärmeerzeugung in Wohngebäuden nutzen zu können, ist zukünftig ein höherer Anteil elektrifizierter Wärmetechnologien einzusetzen, der die Stromverteilnetze stärker als bisher belastet. Die vorliegende Studie identifiziert vorhandene Leistungsgrenzen in Verteilnetzen und Kapazitäten für die Nutzung verschiedener elektrifizierter Wärmetechnologien. Die gleichzeitig verfügbare elektrische Leistung je Haushalt (HH) wird unterschieden für Verteilnetzgebiete städtischer ( $1,8\text{kW}_{\text{el}}$ ), vorstädtischer ( $9,6\text{kW}_{\text{el}}$ ) und ländlicher Struktur ( $4,9\text{kW}_{\text{el}}$ ). In Netzgebieten städtischer Struktur ist künftig ein Mix aus verschiedenen strombeziehenden (Wärmepumpen, Stromheizungen) und -einspeisenden (BHKW) Wärmeerzeugungstechnologien einzusetzen. In Netzgebieten ländlicher Struktur ist auf eine übermäßige Verwendung von Stromheizungen und Luftwärmepumpen zu verzichten. In Netzgebieten vorstädtischer Struktur bestehen keine Restriktionen.

**Keywords:** Wärmewende, Sektorenkopplung, Verteilnetze, Lastflussberechnung, Leistungsgrenzen, Elektrifizierte Wärmetechnologien

## 1 Einleitung

Die Umsetzung der Pariser Klimaschutzziele ist ohne eine Kopplung der Sektoren Strom und Wärme nicht möglich. Wesentliche Technologien sind in dem Zusammenhang elektrifizierte Wärmeerzeuger wie Wärmepumpen und Blockheizkraftwerke (BHKW) [Qua16]. Die vermehrte Nutzung elektrifizierter Wärmeerzeugungstechnologien in Wohngebäuden erhöht den Strombezug (Wärmepumpe) bzw. die Stromeinspeisung (BHKW) in den Verteilnetzen. Im Rahmen dieser Studie wird untersucht, welche Leistungsgrenzen in Verteilnetzen und welche Restriktionen bezüglich der Nutzung verschiedener elektrifizierter Wärmetechnologien bestehen<sup>1</sup>.

## 2 Methodik

Um den maximalen zusätzlichen Strombedarf bzw. die zusätzliche Stromeinspeisung sowie die Auswirkungen der vermehrten Nutzung elektrifizierter Wärmetechnologien auf die Verteilnetze abschätzen zu können, werden verschiedene Szenarien entwickelt und für den

---

<sup>1</sup> Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen eines gemeinsam mit dem Darmstädter Institut Wohnen und Umwelt (IWU, Projektkoordination) und dem Büro für Energiewirtschaft und Technische Planung, Aachen, (BET) durchgeführten Forschungsvorhaben: „Energieeffizienz und zukünftige Energieversorgung im Wohngebäudesektor“ (gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie / Projektträger Jülich, Förderkennzeichen: 03ET4019)

kältesten Tag im Jahr (Heizleistung bei Auslegetemperatur) untersucht. Dabei werden folgende Schritte vorgenommen:

- Auswahl verschiedener Gebäudetypen mit unterschiedlichen Dämmstandards [IWU17a]
- Abschätzung der Nennleistung der Heizung in  $\text{kW}_{\text{th}}/\text{m}^2$  je Gebäudetyp und in  $\text{kW}_{\text{th}}$  je Haushalt (HH) [Annahme:  $\varnothing_{\text{HH}} = 100\text{m}^2$ ] [IWU17b][Bre17]
- Bestimmung von Verteilgraden unterschiedlicher elektrifizierter Wärmetechnologien und Definition von zwei unterschiedlichen Betriebsweisen (monovalent und bivalent) [Bre17]
- Ermittlung der elektrischen Leistung für die Wärmeerzeugung [IWU17a]
- Lastflussrechnung für die Mittelspannung (MS) und Niederspannung (NS) für den kältesten Tag im Jahr in drei Modellnetzen: i) Städtische Struktur, ii) Vorstädtische Struktur und iii) Ländliche Struktur [Wie13] [Rup17]
- Ermittlung der Stromauslastung am Anfang einer MS-Leitung bzw. hinter dem MS-Regeltransformator ( $I_{\text{MS-1}}$ ) und der Spannungsänderung am Ende der letzten NS-Leitung eines Wohngebietes ( $\Delta U_{\text{NS}}$ ) [Rup17]

Um generell bestehende elektrische Leistungsgrenzen in Verteilnetzen abzuschätzen, werden darüber hinaus Lastflussberechnungen zur Grenzwertermittlung für die drei oben erwähnten Modellnetze durchgeführt. Tabelle 1 zeigt die definierten Leistungsgrenzen:

Leistung	Grenzwert	Beschreibung
$P_{\text{HH}+/-, U4\%}$	dena-Empfehlung $U = U_N \pm 4\%$ [dena12]	Elektrische Leistung pro HH, bei der $\Delta U_{\text{NS}}$ 4% beträgt.
$P_{\text{ONT}+/-, U4\%}$		Elektrische Leistung pro Ortsnetz-Trafo (ONT), bei der $\Delta U_{\text{NS}}$ 4% beträgt.
$P_{\text{HH}+/-, U10\%}$	Zulässiges Spannungsband nach EN 50160 $U = U_N \pm 10\%$	Elektrische Leistung pro HH, bei der $\Delta U_{\text{NS}}$ 10% beträgt (kritische Grenze).
$P_{\text{ONT}+/-, U10\%}$		Elektrische Leistung ONT, bei der $\Delta U_{\text{NS}}$ 10% beträgt (kritische Grenze).
$P_{\text{HH}+/-, I_{\text{max}}}$	Strombelastungsgrenze der MS-Leitung	Elektrische Leistung pro HH, bei der $I_{\text{MS-1}}$ 100% beträgt (kritische Grenze).
$P_{\text{ONT}+/-, I_{\text{max}}}$		Elektrische Leistung pro ONT, bei der $I_{\text{MS-1}}$ 100% beträgt (kritische Grenze).

Tabelle 1: Leistungsgrenzen in Verteilnetzen, +/- kennzeichnet die Flussrichtung: + = Strombezug, - = Stromeinspeisung [alle Leistungen in  $\text{kW}_{\text{el}}$ ]

## 2.1 Gebäudeszenarien

Für die Untersuchung werden zunächst verschiedene Gebäudetypen mit unterschiedlichen Dämm-/Modernisierungsstandards definiert. Die Wärmebedarfe [ $\text{kW}_{\text{th}}/\text{m}^2$ ] werden dabei vom IWU<sup>2</sup> in Form stündlicher Wärmebedarfskurven für Heizung und Warmwasser (je Nutzwärme und Verteilverlust) bereitgestellt [IWU17b]. Folgende Gebäudetypen werden definiert:

- Bestandsgebäude Unmodernisiert
- Bestandsgebäude Teilmodernisiert
- Bestandsgebäude Vollmodernisiert
- Neubau: Wärmebedarf in dieser Studie gemittelt aus zwei vom IWU definierten Gebäudetypen: (i) ‚EnEV‘ (Niedrigenergiehaus) und (ii) ‚EH40‘ (KfW Effizienzhaus 40)

<sup>2</sup> Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU): <http://www.iwu.de/>

Zur Vereinfachung wird in dieser Studie von einem Gebäudebestand ausgegangen, der 50% Ein-/Zweifamilienhäuser und 50% Mehrfamilienhäuser beinhaltet. Je Haushalt (HH) wird eine einheitliche Wohnfläche von 100m<sup>2</sup> angenommen.

In einem nächsten Schritt werden verschiedene Gebäudeszenarien entwickelt, die verschiedene Wohngebietsstrukturen abbilden. Für jedes Szenario wird die maximal benötigte Wärmeleistung je HH (Durchschnittswert für das gesamte Wohngebiet) aus den IWU-Wärmebedarfskurven ermittelt. Die Gebäudeszenarien und die entsprechenden Wärmeleistungen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Gebäudeszenario	Bestand Unmodernisiert	Bestand Teilmodernisiert	Bestand Modernisiert	Neubau	Maximale Wärmeleistung je HH [kW <sub>th</sub> ]
<b>Unmodernisiert</b>	100%	0%	0%	0%	8,72
<b>Teilmodernisiert</b>	0%	100%	0%	0%	7,54
<b>Vollmodernisiert</b>	0%	0%	100%	0%	5,91
<b>Neubau</b>	0%	0%	0%	100%	4,14
<b>Gebäudemix</b>	25%	25%	25%	25%	6,58
<b>OPT</b> (Optimistische Dämmentwicklung Bestand)	9,5%	9,5%	81%	0%	6,33
<b>REAL</b> Realistische Dämmentwicklung Bestand	17,5%	17,5%	65%	0%	6,69
<b>PESS</b> Pessimistische Dämmentwicklung Bestand	25,5%	25,5%	49%	0%	7,04

Tabelle 2: Gebäudeszenarien und resultierende Mittelwerte für den maximalen Wärmebedarf je HH

## 2.2 Wärmetechnologien und elektrischer Grundverbrauch

Für die Ermittlung des Strombedarfs bzw. der Stromeinspeisung zur Wärmebereitstellung werden Szenarien („Verteilgrade“) zur Technologienutzung erstellt und zwischen zwei Betriebsweisen unterschieden:

- ‚Monovalent‘: Wärmeerzeugung zu 100% mit elektrifizierter Wärmetechnologie
- ‚Bivalent‘: 50% der benötigten Wärmeleistung wird durch einen Spitzenlastkessel (Gas) bereitgestellt, 50% mit elektrifizierter Wärmetechnologie

Im Folgenden sind die betrachteten elektrifizierten Wärmetechnologien mit den getroffenen Annahmen zu grundlegenden technischen Kennzahlen aufgeführt:

- Stromheizung (SH):  $P_{el} = P_{th}$  (Arbeitszahl AZ= 1)
- Luftwärmepumpe (LWP):  $P_{el} = P_{th} / 1,4$  (Arbeitszahl AZ= 1,4)
- Erdwärmepumpe (EWP):  $P_{el} = P_{th} / 2,5$  (Arbeitszahl AZ= 2,5)
- (Mikro-)BHKW (BHKW):  $\eta_{el} = 35\% / \eta_{th} = 50\%$

Für alle HH wird folgender elektrische Grundverbrauch nach [Pil79] angenommen:

- Maximaler Grundverbrauch (relevant für Engpässe bei Nutzung von Wärmepumpen und Stromheizung): 500W je HH
- Minimaler Grundverbrauch (relevant für Engpässe bei Nutzung von BHKW's): 120W je HH

Ferner wird ein Leistungsfaktor ( $\cos\varphi$ ) des Stromverbrauchs (bzw. der –erzeugung) von 0,97 und ein Gleichzeitigkeitsfaktor (GLF) der Heizungen von 0,9 angenommen. Der GLF basiert dabei auf der Annahme, dass auch an kältesten Tagen nicht alle HH gleichzeitig bewohnt sind und ggfs. einzelne Räume auch an den kältesten Tagen nicht elektrisch beheizt werden.

Tabelle 3 zeigt die gewählten Verteilgrade elektrifizierter Wärmetechnologien und die daraus resultierende elektrische Leistung  $P_{el}$  für den monovalenten Betrieb je Gebäudetyp und HH (in Klammern: Leistungsbedarf bei bivalenter Betriebsweise mit 50% Leistungsbereitstellung durch nicht-elektrische Wärmeversorger).

Gebäudemix Verteilgrad	Unmo- dernisiert	Teilmo- dernisiert	Vollmo- dernisiert	Neu- bau	Gebäude- -mix	OPT	REAL	PESS
<b>SH</b> (nur Stromheizung)	8,72 (4,36)	7,54 (3,77)	5,91 (2,96)	4,14 (2,07)	6,58 (3,29)	6,33 (3,17)	6,69 (3,34)	7,04 (3,52)
<b>LWP</b> (nur Luft-WP)	6,23 (3,11)	5,39 (2,69)	4,22 (2,11)	2,96 (1,48)	4,70 (2,35)	4,52 (2,26)	4,78 (2,39)	5,03 (2,52)
<b>EWP</b> (nur Erd-WP)	3,49 (1,74)	3,02 (1,51)	2,36 (1,18)	1,66 (0,83)	2,63 (1,32)	2,53 (1,27)	2,68 (1,34)	2,82 (1,41)
<b>BHKW</b> (nur BHKW)	6,10 (3,05)	5,28 (2,64)	4,14 (2,07)	2,90 (1,45)	4,60 (2,30)	4,43 (2,22)	4,68 (2,34)	4,93 (2,46)
<b>BAL</b> (25/25/25/25)	3,09 (1,54)	2,67 (1,33)	2,09 (1,04)	1,47 (0,73)	2,33 (1,16)	2,24 (1,12)	2,37 (1,18)	2,49 (1,25)
<b>D-LWP</b> (10/50/20/20)	3,47 (1,73)	3,00 (1,50)	2,35 (1,17)	1,65 (0,82)	2,61 (1,31)	2,51 (1,26)	2,66 (1,33)	2,80 (1,40)
<b>D-EWP</b> (10/20/50/20)	2,64 (1,32)	2,29 (1,14)	1,79 (0,89)	1,26 (0,63)	1,99 (1,00)	1,92 (0,96)	2,03 (1,01)	2,13 (1,07)
<b>D-BHKW</b> (10/20/20/50)	-0,23 (-0,12)	-0,20 (-0,10)	-0,16 (-0,08)	-0,11 (-0,06)	-0,18 (-0,09)	-0,17 (-0,09)	-0,18 (-0,09)	-0,19 (-0,10)

Tabelle 3: Maximaler elektrischer Leistungsbedarf [ $\text{kW}_{el}$ ] für verschiedene Verteilgrade elektrifizierter Wärmetechnologien im monovalenten Betrieb und Gebäudetypen je HH (Leistungsbedarf bei bivalenter Betriebsweise in Klammern)

In Tabelle 3 gelten folgende Abkürzungen:

- BAL: Ausgeglichenere Anteile: 25% SH, LWP, EWP und BHKW
- D-LWP: Dominanz LWP: 10% SH, 50% LWP, 20% EWP, 20% BHKW
- D-EWP: Dominanz EWP: 10% SH, 20% LWP, 50% EWP, 20% BHKW
- D-BHKW: Dominanz BHKW: 10% SH, 20% LWP, 20% EWP, 50% BHKW

## 2.3 Modellnetze

Für die Lastflussberechnung werden drei Modellnetze herangezogen, die von T. Wieland et. al. [Wie13] auf Basis realer Verteilnetze in Österreich erstellt wurden. Die Modellnetze sind unterteilt in Netzgebiete städtischer Struktur ( $14.746 \text{ Einwohner/km}^2$ ), vorstädtischer Struktur ( $217 \text{ Einwohner/km}^2$ ) und ländlicher Struktur ( $52 \text{ Einwohner/km}^2$ ). Abbildung 1 zeigt

beispielhaft die systematische Darstellung des städtischen Modellnetzes. Weitere Details sowie die Darstellungen der anderen Modellnetze können der Studie von [Wie13] entnommen werden.

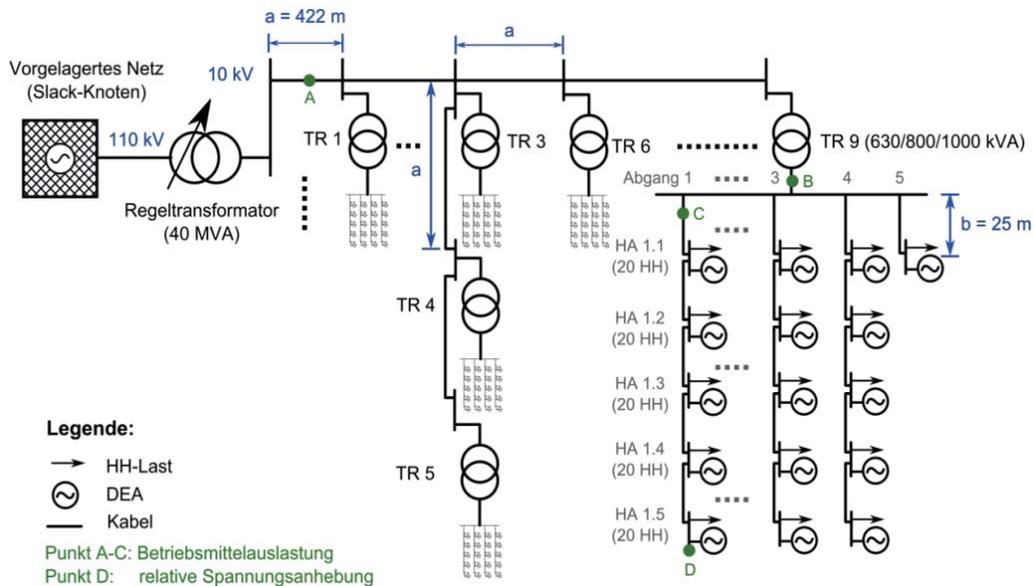


Abbildung 1: Systematische Darstellung des städtischen Modellnetzes [Wie13]

Zur Lastflussberechnung und Identifikation von strom- und spannungsseitigen Engpässen wird ein an der Hochschule Darmstadt (h\_da) entwickeltes Excel-Modell verwendet, das auf den o.g. Modellnetzen basiert [Rup17].

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Leistungsgrenzen im Verteilnetz

Tabelle 4 zeigt die ermittelten Leistungsgrenzen für Verteilnetzgebiete unterschiedlicher Struktur. Die Leistungsgrenzen gelten je HH bzw. ONT, für einen GLF von 1 und für die Summe des gesamten elektrischen Bezugs bzw. der Einspeisung (technologieübergreifend). Die Leistungsgrenze beschreibt die Leistung, die gleichzeitig in jedem HH bezogen (oder eingespeist) werden darf, ohne dass es zu einer Verletzung eines Grenzwerts auf Verteilnetzebene kommt.

Leistungsgrenze	Grenzwert/Bedeutung	Städtisch	Vor-städtisch	Ländlich
$P_{HH+/-, U4\%}$ [ $kW_{el}$ ]	Verletzung der dena-Empfehlung eines 4%-Spannungsbands für die NS-Ebene [dena12]	$\pm 1,8$	$\pm 4,3$	$\pm 2,0$
$P_{ONT+/-, U4\%}$ [ $kW_{el}$ ]		$\pm 739,2$	$\pm 173,2$	$\pm 20,1$
$P_{HH+/-, U10\%}$ [ $kW_{el}$ ]	Verletzung des zulässigen Spannungsbands nach EN 50160 (kritische Grenze $U_N \pm 10\%$ )	$\pm 4,3$	$\pm 10,6$	$\pm 4,9$
$P_{ONT+/-, U10\%}$ [ $kW_{el}$ ]		$\pm 1.793,4$	$\pm 424,0$	$\pm 48,9$
$P_{HH+/-, I_{max}}$ [ $kW_{el}$ ]	Überschreitung der Strombelastungsgrenze (kritische Grenze)	$\pm 1,8$	$\pm 9,6$	$\pm 22,5$
$P_{ONT+/-, I_{max}}$ [ $kW_{el}$ ]		$\pm 756,0$	$\pm 384,8$	$\pm 224,9$

Tabelle 4: Elektrische Leistungsgrenzen [ $kW_{el}$ ] in Verteilnetzen städtischer, vorstädtischer und ländlicher Struktur (die entscheidende, leistungsbegrenzende Grenze ist farbig und fett markiert)

Eine hohe Einwohnerdichte je km<sup>2</sup> und somit „viele HH pro mm<sup>2</sup> Leitungsquerschnitt“ führt in Verteilnetzgebieten städtischer Struktur zu einer relativ geringen gleichzeitig verfügbaren Leistung von 1,8kW<sub>el</sub> pro HA. Der begrenzende Faktor ist die Strombelastbarkeit der MS-Leitung.

In Verteilnetzgebieten ländlicher Struktur beschränken große Leitungslängen aufgrund der geringen Einwohnerdichten je km<sup>2</sup> die gleichzeitig verfügbare Leistung (2,0 - 4,9kW<sub>el</sub> je HH). Begrenzender Faktor ist die Spannung am Ende der NS-Leitung.

In Verteilnetzgebieten vorstädtischer Struktur ist die Anzahl der „HH je Leitungsquerschnitt und –länge“ hingegen relativ ausgeglichen. Die gleichzeitig verfügbare Leistung ist somit am höchsten (9,6kW<sub>el</sub> je HH).

Die maximal verfügbare Leistung in Verteilnetzgebieten vorstädtischer und ländlicher Struktur ist nur durch Ausnutzung des zulässigen Spannungsbands von U<sub>N</sub> ± 10% erreichbar (bei gleichzeitiger Verletzung des von der dena empfohlenen Spannungsbandes von U<sub>N</sub> ± 4%).

### 3.2 Szenarien

Für alle Gebäudeszenarien werden für die verschiedene Wärmetechnologiekombinationen (Verteilgrade) Lastflussberechnungen je Modellnetz für den kältesten Tag (Auslegetemperatur der Heizanlage) vorgenommen. Die Verletzung kritischer Grenzwerte (Strombelastungsgrenze am Anfang der MS-Leitung oder Abweichung von der Nennspannung am Ende der letzten NS-Leitung > ±10%) sind im Folgenden rot markiert. Verletzungen des von der dena empfohlenen Spannungsbands von ±4% sind orange gekennzeichnet. Tabelle 5 zeigt Grenzwertverletzungen im städtischen Modellnetz.

Städtisches Modellnetz	Monovalent				Bivalent			
	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
<i>Unmodernisiert</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>Teilmodernisiert</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>Vollmodernisiert</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>Neubau</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>Gebäudemix</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>OPT</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>REAL</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>PESS</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW

Tabelle 5: Grenzwertverletzungen im städtischen Modellnetz (rot = kritischer Grenzwert verletzt; orange = empfohlener Spannungsbereich verletzt)

In Verteilnetzgebieten städtischer Struktur bestehen demnach mehrere Restriktionen, die berücksichtigt werden sollten. Eine vollständig elektrifizierte Wärmeerzeugung ist nur mit einem Mix aus strombeziehenden (Stromheizungen, Wärmepumpen) und -einspeisenden (BHKW) Technologien möglich. Eine bivalente Betriebsweise erlaubt auch die überwiegende Nutzung der Wärmepumpentechnologie bzw. ausgeglichener Anteile.

In Tabelle 6 sind Grenzwertverletzungen im vorstädtischen Modellnetz dargestellt.

Vorstädtisches Modellnetz	Monovalent				Bivalent			
<i>Unmodernisiert</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>Teilmodernisiert</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>Vollmodernisiert</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>Neubau</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>Gebäudemix</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>OPT</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>REAL</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>PESS</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW

Tabelle 6: Grenzwertverletzungen im vorstädtischen Modellnetz (rot = kritischer Grenzwert verletzt; orange = empfohlener Spannungsbereich verletzt)

Tabelle 6 zeigt, dass in Verteilnetzgebieten vorstädtischer Struktur keine kritischen Grenzen in den gewählten Szenarien verletzt werden. Um die Spannung auf NS-Seite im empfohlenen Bereich von  $U_N \pm 4\%$  zu halten, sollte die überwiegende Nutzung von Stromheizungen und Luftwärmepumpen im monovalenten Betrieb vermieden werden. Stattdessen kann auf ausgeglichene Anteile oder die überwiegende Nutzung von Erdwärmepumpen und BHKW gesetzt werden.

Tabelle 7 zeigt die Grenzwertverletzungen im ländlichen Modellnetz.

Ländliches Modellnetz	Monovalent				Bivalent			
<i>Unmodernisiert</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>Teilmodernisiert</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>Vollmodernisiert</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>Neubau</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>Gebäudemix</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>OPT</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>REAL</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW
<i>PESS</i>	SH	LWP	BAL	D-LWP	SH	LWP	BAL	D-LWP
	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW	EWP	BHKW	D-EWP	D-BHKW

Tabelle 7: Grenzwertverletzungen im ländlichen Modellnetz (rot = kritischer Grenzwert verletzt; orange = empfohlener Spannungsbereich verletzt)

In Verteilnetzen ländlicher Struktur treten aufgrund der geringen Einwohnerdichte kritische Grenzwertverletzungen nur am Ende der NS-Leitung auf (Spannungsbandverletzung nach EN 50160). Jedoch können bei Ausnutzung des gesamten zur Verfügung stehenden Spannungsbandes von  $U_N \pm 10\%$  verschiedene Technologiekombinationen auch im monovalenten Betrieb genutzt werden, wenn eine übermäßige Nutzung von Stromheizungen und Luftwärmepumpen vermieden wird.

## 4 Fazit

Diese Studie beziffert die zur Verfügung stehende elektrische Leistung, sowie bestehende Restriktionen bzgl. der Nutzung elektrifizierter Wärmetechnologien in Verteilnetzen unterschiedlicher Struktur (1,8 - 9,6kW<sub>el</sub> je HH). Im Hinblick auf die Wärmewende bestehen mehrere nutzbare Optionen unterschiedlicher elektrifizierter Wärmetechnologien, die bereits heute in die bestehenden Verteilnetze integriert werden können um die Sektoren Wärme und Strom zu koppeln. Ein Ausbau der Kapazitäten in Verteilnetzen ist für eine erfolgreiche Umsetzung der Wärmewende nicht notwendig. Diese Einschätzung wird auch durch eine Umfrage unter verschiedenen Verteilnetzbetreibern in Deutschland bestätigt [Bre17].

Hinsichtlich der Integrierbarkeit verschiedener elektrifizierter Wärmetechnologien bestehen je nach Verteilnetzstruktur unterschiedliche Restriktionen. Die wichtigsten sind:

- In Verteilnetzen städtischer Struktur ist ein Mix aus strombeziehenden (Wärmepumpen, Stromheizung) und –einspeisenden (BHKW) Wärmetechnologien vorzuziehen. Alternativ kann eine bivalente Betriebsweise mit nicht-elektrischer Spitzenlastzeugung umgesetzt werden.
- In Verteilnetzen vorstädtischer Struktur bestehen keine Restriktionen.
- In Verteilnetzen ländlicher Struktur ist von einer übermäßigen Nutzung von Stromheizungen und Luftwärmepumpen abzusehen. Unter Ausnutzung des zulässigen Spannungsbandes können ansonsten nahezu alle Optionen umgesetzt werden.

### Maßnahmen zur Erweiterung von Kapazitäten in Verteilnetzen

Die Literatur führt viele Maßnahmen auf, mit deren Hilfe die zur Verfügung stehende Leistung je HH in Verteilnetzen erhöht werden kann (z.B. [Wie13], [dena12]). Demnach existieren bereits technische Möglichkeiten um bestehende Leistungsgrenzen in Zukunft zu erhöhen bzw. andere Technologiekombinationen als die hier beschriebenen zu realisieren. Ebenfalls können Maßnahmen ergriffen werden um in Zukunft auch die Elektromobilität in die Verteilnetze zu integrieren.

### Anwendbarkeit

Die vorliegende Studie verwendet vereinfachte Modellnetze, die auf realen Netzstrukturen in Österreich basieren. Die Erkenntnisse sind daher nicht zwingend auf andere Länder, z.B. Deutschland (DE), übertragbar. Die Autoren gehen jedoch davon aus, dass Verteilnetze in Deutschland durchaus vergleichbare Strukturen in Gebieten ähnlicher Einwohnerdichte aufweisen. Für generelle Abschätzungen für die Verfügbarkeit von Kapazitäten je HH in Verteilnetzen schlagen wir vor, die hier genannten Modellnetze auf Gebiete unterschiedlicher Einwohnerdichte in Deutschland anzuwenden. Ein entsprechender Vorschlag ist in Tabelle 8 dargestellt.

Netzstruktur	Einwohnerdichte laut [Wie13]	Vorschlag: Anwendung in DE für Gemeinden mit
Städtisch	14.746 /km <sup>2</sup>	> 1.000 Einwohner/km <sup>2</sup>
Vorstädtisch	217 /km <sup>2</sup>	101 bis 1.000 Einwohner/km <sup>2</sup>
Ländlich	52 /km <sup>2</sup>	< 100 Einwohner/km <sup>2</sup>

Tabelle 8: Vorschlag für die Anwendung der verwendeten Netzstrukturen auf Gebiete unterschiedlicher Einwohnerdichte in Deutschland

## Schwächen und Further Research

Bei der Anwendung der Erkenntnisse dieser Studie ist zu bedenken, dass die Sektorenkopplung Wärme/Strom hier isoliert betrachtet und die Kopplung mit dem Verkehrssektor vernachlässigt wird. Betrachtungen unter Einbeziehung des Verkehrssektors bzw. der Verkehrswende (E-Mobility und Ladeinfrastruktur) werden in Zukunft ein umfassenderes Bild ergeben.

Des Weiteren weichen reale Verteilnetze gegebenenfalls von den hier genutzten Modellnetzen ab, was in konkreten Fällen eine Einzelfallbetrachtung notwendig macht. Hier werden außerdem lediglich die offensichtlichen Schwachstellen (Anfang der MS-Leitung, Ende der NS-Leitung) betrachtet.

## 5 Literatur

- [Qua16] Volker Quaschnig, "Sektorenkopplung durch die Energiewende", HTW Berlin, 20.06.2016.
- [IWU17a] Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), "Modellentwicklung zur Analyse des zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und -nachfrage im Wohngebäudesektor", Darmstadt, 29.03.2017.
- [IWU17b] Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), "IWU-Modell EE-Gebäude-Zukunft – Export verschiedener Wärmebedarfskurven für verschiedene Gebäudetypen", Darmstadt, Juni 2017.
- [Bre17] S. Brenner, „Auswirkungen auf die Verteilnetze bei Zunahme elektrifizierter Wärmetechnologien in Wohngebäuden im Rahmen der Wärmewende in 2050“, Master Thesis, Hochschule Darmstadt, 14.08.2017.
- [Wie13] T. Wieland, F. Otto, L. Fickert, T. K. Schuster, „Analyse, Bewertung und Steigerung möglicher Einspeisekapazität dezentraler Energieerzeugungsanlagen in der Verteilnetzebene“, 8. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, IEWT 2013.
- [Rup17] H. Ruppert, K.-M. Graf, „Vereinfachtes Excel-Modell zur statischen Lastflussberechnung in Verteilnetzen bei Nutzung verschiedener elektrifizierter Wärmetechnologien in Haushalten“, Hochschule Darmstadt, Fachbereich EIT, 13.07.2017 [Online verfügbar unter: <https://eit.h-da.de/forschung/forschungsfelder/energietechnik/projektgruppe-smart-grids/publikationen/>, Letzter Zugriff: 09.11.2017].
- [dena12] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030“, Berlin, 11.12.2012.
- [Pill79] W. Piller, „Der elektrische Leistungsbedarf von Haushalten“, VDI/VDE/GFPE-Tagung, Schliersee, 16./17. Mai 1979.