

## **Exergie-Analyse auf kommunaler Ebene am Beispiel der ökologischen Siedlung Oberzwehren**

**Kai Morgenstern, Christina Sager, Kirsten Lück, Herena Torio**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

**Keywords:** Exergie, Fernwärme, Siedlungsversorgung

### **Zusammenfassung**

Im Rahmen einer Exergie-Analyse werden Energieflüsse nicht nur bezüglich ihrer Quantität bewertet, sondern es wird auch ihre Qualität berücksichtigt. Es wird also nicht nur analysiert, ob eine zur Verfügung stehende Energiemenge ausreichend ist, um z.B. ein Gebäude zu heizen, sondern der genutzte Energieträger wird auch mit Bezug auf seine Nutzbarkeit für höherwertigere Anwendungen bewertet. Dazu dient das Konzept der Exergie. Das ist der Anteil der Energie, der vollständig in Arbeit umgewandelt werden kann. So wird z.B. in der Gebäudeheizung Raumwärme im Bereich von 20°C bereitgestellt. Die Nutzung von Strom für diesen Zweck wäre mit einem hohen Exergieverlust verbunden, denn Strom kann nahezu vollständig in Arbeit umgewandelt werden. Dagegen wäre z.B. die Abwärme industrieller Produktionsprozesse wegen ihres ohnehin geringen Exergieinhalts besser an die exergetisch geringen Anforderungen der Raumheizung angepasst.

In Kommunen liegen Energieerzeugung und -verbrauch räumlich oft sehr nah beieinander. Daher ist die kommunale Ebene in besonderer Weise geeignet, um mit Hilfe der Exergie-Analyse die Energieversorgung zu optimieren. Energieverbraucher können z.B. in Richtung abnehmender Exergieanforderungen nacheinander geschaltet werden (Kaskadierung). Im Projekts "Ökologische Siedlungsentwicklung Kassel-Oberzwehren" werden Möglichkeiten einer solchen Optimierung für ein Neubaugebiet im Rahmen des BMWi-Programms EnEff:Stadt untersucht. Dabei wird die Verbrauchsseite optimiert, indem durch bauliche Vorgaben hohe Energieeffizienzstandards verwirklicht werden. Auf der Versorgerseite werden innovative Konzepte z.B. durch die Nutzung eines vorhandenen Fernwärmerücklaufs verwirklicht.

Im Rahmen dieses Beitrags wird das Exergiekonzept erläutert. Beispielhaft wird die Energiebereitstellung in Wohngebäuden exergetisch analysiert und diese Analyse auf Siedlungen erweitert. Diese Technik wird für die Darstellung der exergetische Optimierung der ökologischen Siedlung Oberzwehren im Modell genutzt.

### **1. Energie und Exergie**

Energie besitzt nicht nur eine Quantität sondern auch eine Qualität, die von verschiedenen Randbedingungen abhängig ist. Bei irreversiblen energetischen Umwandlungsprozessen wird die Energiemenge stets erhalten (erster Hauptsatz der Thermodynamik) aber nur ein Teil dieser Energiemenge kann in beliebige andere Energieformen umgewandelt werden (zweiter Hauptsatz der Thermodynamik). Dieser qualitativ hochwertige Anteil wird als Exergie bezeichnet, während man den Anteil der Energie, der sich nicht in andere Energieformen umwandeln lässt, als Anergie bezeichnet:

$$\text{Energie} = \text{Exergie} + \text{Anergie} \quad (1)$$

Exergie kann daher als der wertvolle Anteil der Energie angesehen werden. Das Exergiekonzept ist geeignet aufzuzeigen, an welcher Stelle und in welchem Umfang bei Energiewandlungsprozessen eine Entwertung der Energie stattfindet.

Die Exergie  $Ex$ , die in einem Energiefluss  $Q$  mit Temperatur  $T$  enthalten, kann zum Beispiel in Form mechanische Arbeit ( $W$ ) gewonnen werden. Dabei hängt die Menge der gewonnenen Arbeit von der Temperatur  $T_{ref}$  der Referenzumgebung des Arbeitsprozesses ab. Der Wirkungsgrad, also das Verhältnis von gewonnener mechanischer Arbeit zu aufgewandter Energie, ist stets kleiner oder gleich dem Wirkungsgrad  $\eta_c$  des Carnotschen Kreisprozesses, mit dessen Hilfe sich also der thermische Exergieinhalt von  $Q$  berechnen lässt:

$$\eta_c = \frac{W}{Q} = \frac{Ex}{Q} = 1 - \frac{T_{ref}}{T} \Rightarrow Ex = Q \left( 1 - \frac{T_{ref}}{T} \right) \quad (2)$$

Der Carnot-Factor beschreibt also den Exergieanteil der Energie.

Die Raumheizung verbraucht den größten Anteil der in Wohngebäuden insgesamt benötigten Energie. Typischerweise wird dabei Raumluft mit einer Temperatur von 20°C zur Verfügung gestellt. Für Wohngebäude wählt man sinnvoller Weise die Außenluft als Referenzumgebung, da letztendlich alle Energie, die innerhalb eines Gebäude umgewandelt wird, dorthin abgegeben wird. Wird dabei für die Heizperiode in Deutschland von einer Umgebungstemperatur von 0°C ausgegangen, ergibt sich ein Exergieanteil von 0,05.

## 2. Die ökologische Siedlung Kassel-Oberzwehren

Die Stadt Kassel beabsichtigt, auf dem Grundstück der ehemaligen Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau der Universität Kassel im Stadtteil Oberzwehren ein Baugebiet für Wohnbebauung mit hohen bauökologischen Standards auszuweisen, um Bauinteressenten für das umweltfreundliche Bauen in der Stadt Kassel zu gewinnen (Abb. 1a). Zielsetzung ist die Entwicklung eines ökologischen Baugebietes mit hoher städtebaulicher und architektonischer Qualität sowie die Umsetzung von innovativen energetischen Lösungen.

Die Stadt Kassel hat als ökologisches Ziel den Wunsch einer CO<sub>2</sub>-neutralen Wärmeversorgung als Leitbild formuliert. Hierfür sollen

- die durch den Heiz- und Warmwasserenergiebedarf bedingten CO<sub>2</sub>-äquivalent-Emissionen durch hohe Energieeffizienz und den Einsatz erneuerbarer Energien so optimiert werden, dass ein rechnerischer Ausgleich der jährlichen CO<sub>2</sub>-Bilanz erreicht wird,
- die weiteren lebenszyklusweiten Stoff- und Energieströme reduziert und
- diese Ziele möglichst kostengünstig und mit verlässlichen Bau- und Betriebsweisen sowie mit marktgängiger Technik umgesetzt werden.

Diese Maßnahmen stellen erste Schritte auf dem Weg zu einer Anpassung der Bau- und Siedlungsstruktur an sich verändernden Klimabedingungen dar. Die durch die Erzeugung von Heizwärme und Warmwasser entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen sollen durch die Einspeisung von Strom aus erneuerbarer Energie ins übergeordnete Netz ausgeglichen werden. Der Wärmebedarf und die Nutzung erneuerbarer Energien müssen deshalb aufeinander abgestimmt werden. Ein effizienter Umgang mit Energie ist die notwendige Voraussetzung für geringe CO<sub>2</sub>-Emissionen.

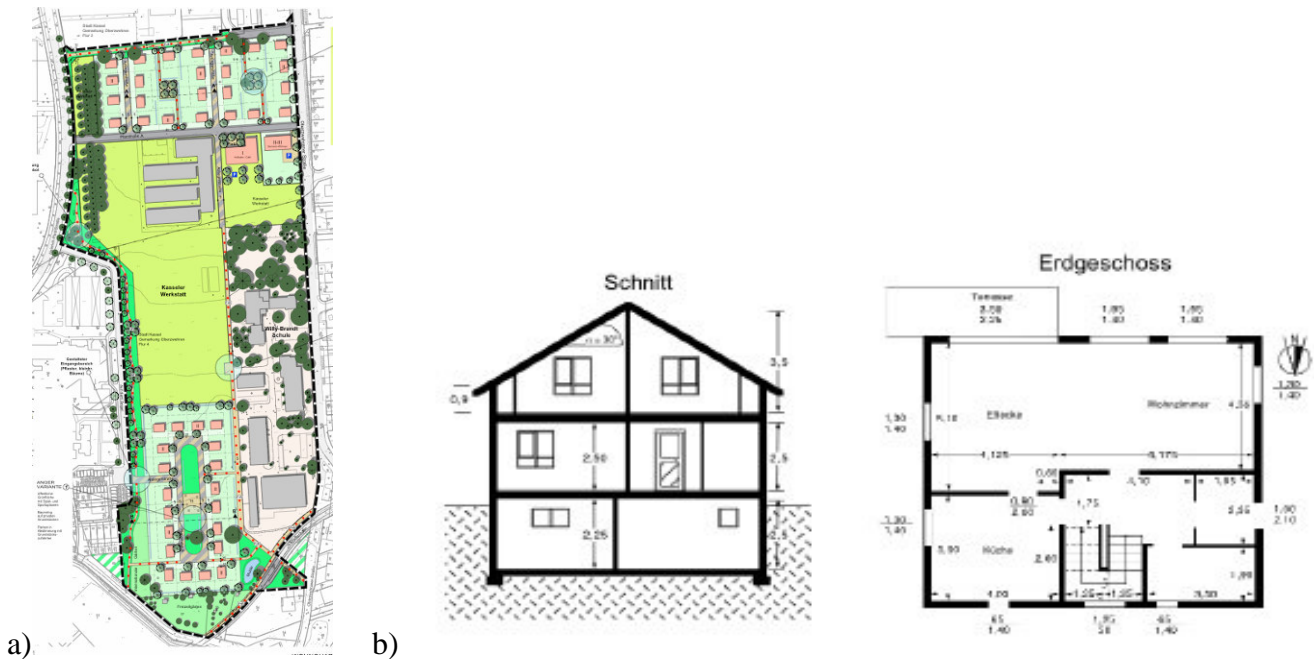


Abb. 1: a) Geplante Bebauung für die ökologische Siedlung Oberzwehren mit b) Modellierter Einfamilienhäuser

Im nördlichen Teil des Bebauungsgebietes verläuft eine Fernwärmeleitung der Städtischen Werke Kassel, über die die Gebäude eines ökologischen Gartenbaubetriebs und der Berufsschule für Garten- und Landschaftsbau des Landkreises Kassel beheizt werden. Das südliche Gebiet ist bislang noch nicht mit Fernwärme erschlossen. Eine Fernwärmeversorgung lohnt sich hier aufgrund der langen Leitungswege und der voraussichtlich geringen Anschlussleistung für die Städtischen Werke Kassel nicht. Daher sind hier alternative Energieversorgungskonzepte sinnvoll und notwendig.

Im Folgenden wird modellhaft die Heizwärmeversorgung der für den nördlichen Teil vorgesehenen 24 Einfamilienhäuser dargestellt und die exergetische Optimierung der Versorgung durch Nutzung der vorhandenen Fernwärmeleitung bzw. des Fernwärmerücklaufs diskutiert.

Tab. 1: Rahmendaten der Einfamilienhäuser für die ökologische Siedlung Oberzwehren.

|                                    |                     |
|------------------------------------|---------------------|
| Anzahl der Vollgeschosse           | 2                   |
| Breite                             | 11,2 m              |
| Tiefe                              | 9,9 m               |
| Höhe                               | 8,8 m               |
| Netto-Grundfläche                  | 175 m <sup>2</sup>  |
| Nutzfläche                         | 214 m <sup>2</sup>  |
| Hüllfläche                         | 477 m <sup>2</sup>  |
| Volumen                            | 670 m <sup>3</sup>  |
| Einseitige Dachfläche, Neigung 40% | 62,5 m <sup>2</sup> |
| Kompaktheit                        | 0,71                |

Die Wohngebäude in der ökologischen Siedlung wurden als Einfamilienhäuser mit einer Netto-Grundfläche von 175 m<sup>2</sup> ausgelegt (Abb. 1b, Tab. 1). Dabei wird von einer Belegung mit vier Bewohnern ausgegangen.

Um die Exergieverluste bei der Raumheizung zu minimieren sollen in den Einfamilienhäusern Fußbodenheizungen mit einer Vorlauf- und Rücklauf Temperatur von 32°C bzw. 27°C zu Einsatz kommen. Für die Trinkwarmwasserversorgung muss zur Unterdrückung von Legionellen eine Temperatur von 50°C immer gewährleistet sein (AGFW-Merkblatt FW 526).

### 3. Exergetische Optimierung der Siedlung

#### 3.1 Energie- und Exergiebedarf

Im Rahmen des IEA-Projektes Annex 49 – Low Exergy Systems for High Performance Buildings and Communities wurde eine Methode entwickelt, welche die dynamische Berechnung der Exergyflüsse für Wohngebäude erlaubt (Schmidt & Torio, 2009). Dabei werden als Referenztemperaturen stündliche Messwerte der Außentemperatur zugrunde gelegt und alle Energiewandlungen im Zuge der Raumwärme- und Trinkwarmwasserbereitstellung auf diese Temperatur bezogen.

Die Methode wurde in TRNSYS implementiert und verwendet um zunächst Energie- und Exergiebedarf des oben beschriebenen Einfamilienhauses zu bestimmen (Tab. 1). Dabei wurden drei verschiedene Gebäudestandards zugrunde gelegt: Die geltenden Energieeinsparverordnung (EnEV 2009), die einen Heizwärmebedarf von höchstens 70 kWh m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> erlaubt, ein Niedrigenergiehausstandard mit der Anforderung, den EnEV 2009-Bedarf um 40% zu unterschreiten, und der Passivhausstandard, der einen Heizwärmebedarf von nicht mehr als 15 kWh m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> erlaubt.

Tab. 2: Energie- und Exergiebedarf (kWh m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>) der Einfamilienhäuser für die ökologische Siedlung Oberzwehren.

| Dämmstandard       | Energiebedarf |                  |        | Exergiebedarf |                  |        |
|--------------------|---------------|------------------|--------|---------------|------------------|--------|
|                    | Heizen        | <sup>a</sup> TWW | Gesamt | Heizen        | <sup>a</sup> TWW | Gesamt |
| EnEV 2009          | 62,1          | 13,0             | 75,1   | 4,2           | 0,9              | 5,0    |
| Niedrigenergiehaus | 36,7          | 13,0             | 49,7   | 2,5           | 0,9              | 3,4    |
| Passivhaus         | 10,7          | 13,0             | 23,6   | 0,8           | 0,9              | 1,7    |

a: Trinkwarmwasser

Energie- und Exergiebedarf für die Bereitstellung von Trinkwarmwasser (TWW) sind in allen drei Fällen gleich, da dieser Bedarf nicht vom Dämmstandardabhängig ist. Wie vorgegeben sinkt der Heizwärmebedarf von 62,1 kWh m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> für das EnEV 2009-Haus über 36,7 kWh m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> für das Niedrigenergiehaus bis zu 10,7 kWh m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> für das Passivhaus. Die entsprechenden Exergiebedarfe für Heizwärme sinken in etwa gleichem Verhältnis von 4,2 über 2,5 auf 0,8 kWh m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>. Energie- und Exergiebedarf sind also stark aneinander gekoppelt, allerdings nimmt der konstante Exergiebedarf für die TWW-Bereitstellung einen immer größeren Anteil des Gesamt-Exergiebedarfs in Anspruch, so dass für das Passivhaus der überwiegende Teil für die TWW-Bereitstellung aufgewendet werden muss.

### 3.2 Untersuchte Energieversorgungskonzepte

Die zur Bereitstellung des Energie- und Exergiebedarfs tatsächlich verbrauchte Endenergie wurde für sechs Kombinationen aus Dämmstandard und Energieversorgungskonzepten verglichen (Tab. 3). Ziel war es dabei zu ermitteln, ob ein Nahwärmenetz für die ökologische Siedlung sowohl aus energetischer als auch aus exergetischer Sicht eine effiziente Versorgungsoption darstellt. Als Referenz diente die Heizwärme- und TWW-Versorgung mit einem hausinternen Gas-Brennwertkessel.

Tab. 3: Untersuchte Konfigurationen für die Ausführung der Einfamilienhäuser in der ökologischen Siedlung Oberzwehren.

| Nr. | Konfiguration   | Dämmstandard       | Heiztechnik  |
|-----|-----------------|--------------------|--|
| 1   | Referenz        | EnEV 2009          | Gas-Brennwertkessel für Heizung und TWW                                  |
| 2   | RL 1WT          | EnEV 2009          | Fernwärme-Rücklauf (50°C), 1 Wärmetauscher für Heizung und TWW           |
| 3   | RL 2WT          | EnEV 2009          | Fernwärme-Rücklauf (50°C), 2 Wärmetauscher, je einer für Heizung und TWW |
| 4   | RL 2WT NEH      | Niedrigenergiehaus | Fernwärme-Rücklauf (50°C), 2 Wärmetauscher, je einer für Heizung und TWW |
| 5   | RL 2WT NEH 30°C | Niedrigenergiehaus | Fernwärme-Rücklauf (30°C), 2 Wärmetauscher, je einer für Heizung und TWW |

Die Versorgung des siedlungseigenen Nahwärmenetzes soll aus dem Fernwärmerücklauf erfolgen. Dieser Rücklauf hat nach Angaben der Stadt Kassel eine Mindesttemperatur von 50°C. Aufgrund der Temperaturabsenkung im Wärmetauscher muss das TWW wieder auf eine Temperatur von 50°C aufgeheizt werden. Dazu sind in allen Rücklaufnutzungskonzepten strombetriebene Durchlauferhitzer vorgesehen. Die am zentralen Wärmetauscher entnommene Energie wurde hier als Endenergie zugrunde gelegt. Wärmeverluste im Nahwärmenetz wurden anteilig auf die Einzelhäuser umgelegt.

Drei Versorgungsvarianten wurden untersucht: Neben der konventionellen Nutzung eines einzigen Wärmetauschers wurde auch der Einsatz getrennter Wärmetauscher zur Trinkwarmwasser- und Heizwärmeversorgung untersucht. Diese Versorgungsvariante erlaubt es, die primärseitige Netzzücklaufumtemperatur stärker zu senken und so die Effizienz des Heizkraftwerkes zu erhöhen. Schließlich wurde für diese Variante noch die Nutzung einer hypothetischen Rücklaufumtemperatur von 30°C in Kombination mit dem Niedrigenergiehausstandard untersucht.

### 3.3 Endenergie- und Endexergieverbrauch

Die Endenergie und Endexergie sind die zur Bereitstellung des unter 3.1 ermittelten Bedarfs an der Übergabestelle benötigte Energie bzw. Exergie. Für das Referenzszenario mit Gas-Brennwertkessel ergeben sich dabei aufgrund des hohen Wirkungsgrades des Kessels nur Verluste von etwa 4% gegenüber dem Bedarf (Tab. 2). Bei der Fernwärmerücklaufversorgung dagegen werden die Verluste im Nahwärmenetz hinter der Übergabestelle mit berücksichtigt. Diese wurden mit etwa 15% angesetzt was für ein älteres, nicht-optimiertes Nahwärmenetz typisch wäre. Für ein neu zu verlegendes Netz wären in der Realität Verluste von etwa 10% zu erwarten.

Während der Brennwertkessel Energie mit einem sehr hohen Exergieanteil (95%) bereitstellt, liegen die Exergieanteile bei der Versorgung mit Nahwärmenetz deutlich näher am Bedarf: Für das EnEV 2009 Haus mit  $5,0 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  Exergiebedarf liefern die zwei Nahwärme-Varianten 12,4 bzw.

11,5 kWh m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>. Beim Niedrigenergiehaus ist bei 50°C Vorlauftemperatur das Verhältnis ähnlich (3,4 kWh m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> Bedarf zu 8,4 kWh m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> Endenergieverbrauch). Bei einer Vorlauftemperatur von 30°C muss jedoch viel Strom zum Nachheizen des TWW auf 50°C aufgewendet werden und da dieser reine Exergie ist, steigt der Exergieverbrauch auf 11,3 kWh m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> und ist damit dem des EnEV 2009-Hauses vergleichbar.

Tab. 4: Endenergie- und Endexergieverbrauch (kWh m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>) der Einfamilienhäuser für die ökologische Siedlung Oberwehren.

| Nr. | Konfiguration      | Endenergieverbrauch |                  |                    | Endexergieverbrauch |        |                  |                    |        |
|-----|--------------------|---------------------|------------------|--------------------|---------------------|--------|------------------|--------------------|--------|
|     |                    | Heizen              | <sup>a</sup> TWW | <sup>b</sup> Strom | Gesamt              | Heizen | <sup>a</sup> TWW | <sup>b</sup> Strom | Gesamt |
| 1   | Referenz           | 78,2                | -                | -                  | 78,2                | 74,3   | -                | -                  | 74,3   |
| 2   | RL 1WT             | 88,7                | -                | 1,3                | 90,0                | 11,1   | -                | 1,3                | 12,4   |
| 3   | RL 2WT             | 65,8                | 23,0             | 1,3                | 90,1                | 2,5    | 7,6              | 1,3                | 11,5   |
| 4   | RL 2WT NEH         | 39,8                | 23,0             | 1,3                | 64,1                | 2,5    | 4,6              | 1,3                | 8,4    |
| 5   | RL 2WT NEH<br>30°C | 39,5                | 10,3             | 7,1                | 56,8                | 0,7    | 3,4              | 7,1                | 11,3   |

a: Nur separat ausgewiesen, wenn zwei Wärmetauscher genutzt werden.

b: Durchlauferhitzer und Pumpen im Nahwärmenetz

### 3.4 Primärenergie- und Primärexergieverbrauch

Wie stark sich der Primärenergieverbrauch bei Nutzung der Fernwärmeversorgung gegenüber der Versorgung durch einen Gas-Brennwertkessel reduziert hängt stark von der Primärenergienutzung bei der Erzeugung der Fernwärme ab. Diese wird durch den Primärenergiefaktor  $F_p$  beschrieben, der angibt wie viele Einheiten Primärenergie zur Bereitstellung einer Einheit Endenergie gebraucht werden. Da Raffinierung und Transport von Erdgas Energien verbrauchen, wird für Gas typischerweise  $F_p = 1,1$  angenommen.

Tab. 5a vergleicht die Primärenergieverbräuche der Referenzausführung mit einer typischen Fernwärmeerzeugung mit einem Primärenergiefaktor von  $F_p = 0,7$ . Für Strom wurde der Gesamtprimärenergiefaktor  $F_p = 2,7$  für das deutsche Stromnetz angenommen. Tatsächlich hat die Kasseler Fernwärme aber einen sehr günstigen Primärenergiefaktor von  $F_p = 0,08$ . Außerdem sollen die Häuser mit Photovoltaikanlagen ausgestattet werden. Wird dieser Strom zum Betrieb der Durchlauferhitzer und Pumpen verwendet, geht er mit  $F_p = 0$  in die Primärenergiebilanz ein. Die Primärenergieverbräuche für dieses tatsächliche Szenario sind in Tab. 5b aufgeführt.

Für die typische Fernwärmerücklaufversorgung ist der Primärenergieverbrauch selbst für das EnEV 2009-Haus niedriger als für die Referenzlösung. Für das Niedrigenergiehaus mit 50°C-Rücklaufversorgung ist der Primärenergieverbrauch sogar 45% niedriger als für den Referenzfall. Die Fernwärmerücklaufversorgung bei 30°C bringt primärenergetisch wegen des hohen Primärenergiefaktors für Strom keine Verbesserung.

Die Verbräuche an Primärenergie verhalten sich ähnlich denen für Endenergie. Da Erdgas einen sehr hohen Exergieanteil besitzt ist auch der Primärenergieverbrauch entsprechend hoch. Bei den Fernwärmerücklaufversorgungsvarianten bei 50°C gleicht der hohe Primärenergiefaktor für Strom in etwa die günstigere Bewertung der Fernwärme aus, so dass die Gesamtprimärenergieverbräuche den Endenergieverbräuchen ähnlich sind. Bei der Fernwärmerücklaufversorgung bei 30°C schlägt sich der hohe Exergieanteil im Strom in Verbindung mit dem hohen Primärenergiefaktor besonders

stark nieder, so dass primärenergetisch betrachtet diese Lösung von allen Fernwärmevarianten mit Abstand am schlechtesten abschneidet.

Tab. 5a: Primärenergie- und Primärenergieverbrauch ( $\text{kWh m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ) der Einfamilienhäuser für die ökologische Siedlung Oberzwehren mit einem angenommenen Primärenergiefaktor von  $F_p = 0,7$  für die Fernwärme und  $F_p = 2,7$  für Strom.

| Nr. | Konfiguration      | Primärenergieverbrauch |                  |                    |        | Primärenergieverbrauch |                  |                    |        |
|-----|--------------------|------------------------|------------------|--------------------|--------|------------------------|------------------|--------------------|--------|
|     |                    | Heizen                 | <sup>a</sup> TWW | <sup>b</sup> Strom | Gesamt | Heizen                 | <sup>a</sup> TWW | <sup>b</sup> Strom | Gesamt |
| 1   | Referenz           | 86,0                   | -                | -                  | 86,0   | 81,7                   | -                | -                  | 81,7   |
| 2   | RL 1WT             | 62,1                   | -                | 3,5                | 65,6   | 7,8                    | -                | 3,5                | 11,7   |
| 3   | RL 2WT             | 16,1                   | 46,0             | 3,5                | 65,7   | 1,8                    | 5,3              | 3,5                | 11,0   |
| 4   | RL 2WT NEH         | 16,1                   | 27,8             | 3,4                | 47,4   | 1,8                    | 3,2              | 3,4                | 8,8    |
| 5   | RL 2WT NEH<br>30°C | 7,2                    | 27,6             | 19,1               | 53,9   | 0,5                    | 2,4              | 19,1               | 24,2   |

a: Nur separat ausgewiesen, wenn zwei Wärmetauscher genutzt werden.

b: Durchlauferhitzer und Pumpen im Nahwärmenetz

Tab. 5b: Primärenergie- und Primärenergieverbrauch ( $\text{kWh m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ) der Einfamilienhäuser für die ökologische Siedlung Oberzwehren mit dem tatsächlichen Primärenergiefaktor der Kasseler Fernwärme von  $F_p = 0,08$  und  $F_p = 1$  für Strom.

| Nr. | Konfiguration      | Primärenergieverbrauch |                  |                    |        | Primärenergieverbrauch |                  |                    |        |
|-----|--------------------|------------------------|------------------|--------------------|--------|------------------------|------------------|--------------------|--------|
|     |                    | Heizen                 | <sup>a</sup> TWW | <sup>b</sup> Strom | Gesamt | Heizen                 | <sup>a</sup> TWW | <sup>b</sup> Strom | Gesamt |
| 1   | Referenz           | 86,0                   | -                | -                  | 86,0   | 81,7                   | -                | -                  | 81,7   |
| 2   | RL 1WT             | 7,1                    | -                | 1,3                | 8,4    | 0,9                    | -                | 1,3                | 2,2    |
| 3   | RL 2WT             | 1,8                    | 5,3              | 1,3                | 8,4    | 0,2                    | 0,6              | 1,3                | 2,1    |
| 4   | RL 2WT NEH         | 1,8                    | 3,2              | 1,3                | 6,3    | 0,2                    | 0,4              | 1,3                | 1,8    |
| 5   | RL 2WT NEH<br>30°C | 0,8                    | 3,2              | 7,1                | 11,1   | 0,1                    | 0,3              | 7,1                | 7,4    |

a: Nur separat ausgewiesen, wenn zwei Wärmetauscher genutzt werden.

b: Durchlauferhitzer und Pumpen im Nahwärmenetz

Die Kasseler Fernwärme ist mit  $F_p = 0,08$  sehr günstig bewertet. Da auch für Photovoltaikstrom üblicherweise lediglich ein Primärenergiefaktor von  $F_p = 1,0$  verwendet wird, beträgt der Gesamtprimärenergieverbrauch für die Fernwärmerücklaufszzenarien mit einer 50°C-Versorgung weniger als 10% der Referenzvariante. Für die Primärenergie liegen die Werte sogar unter 3%.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Nutzung des Fernwärmerücklaufs stellt sowohl energetisch als auch exergetisch eine günstige Lösung für die Heizwärme und TWW-Versorgung der ökologischen Siedlung Oberzwehren dar. Der niedrige Primärenergiefaktor der Kasseler Fernwärme führt zu extrem niedrigen Primärenergieverbräuchen, aber auch für Faktoren wie sie für Fernwärmesysteme typisch sind ergeben sich noch Verbräuche die niedriger sind als solche wie sie mit einem Gasbrennwertkessel verbunden wären.

Die Endenergiebetrachtung zeigt, dass es wünschenswert wäre, die Häuser der Siedlung mindestens im Niedrigenergiestandard auszuführen, um deutliche Verbesserungen im

Energieverbrauch gegenüber dem Referenzfall zu erzielen. Eine Versorgung mit getrennten Wärmetauschern für Heizwärme und TWW bringt dagegen sowohl energetisch als auch exergetisch nur geringe Vorteile.

### **Quellenangaben**

SCHMIDT, D. & TORIO, H. (EDS.): Midterm Annex 49 Report – Framework for exergy analysis on building and community level. Fraunhofer-IRB Verlag, Stuttgart (2009).

Dr. Kai Morgenstern; Fraunhofer-Institut für Bauphysik; Projektgruppe Kassel; Gottschalkstraße 28A; 34127 Kassel  
kai.morgenstern@ibp.fraunhofer.de