

## GUTACHTEN

# Bezifferung der CO<sub>2</sub>-Intensität von Wärmerückgewinnungssystemen (WRG-Systemen) Raumluftechnischer Geräte (RLT-Geräte) für Nicht-Wohngebäude

**Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup**

Honorarprofessur für Energieeffizienz  
und Wärmerückgewinnung



12.11.2019

Das Gutachten umfasst 12 Seiten

## ***Gutachten zur Bezifferung der CO<sub>2</sub>-Intensität von Wärmerückgewinnungssystemen (WRG-Systemen) Raumluftechnischer Geräte (RLT-Geräte) für Nicht-Wohngebäude***

Im Auftrag der TGA Repräsentanz in Berlin in der Trägerschaft des Bundesindustrieverbands Technische Gebäudeausrüstung e. V., des Fachverbands Gebäudeklima e. V. sowie des Herstellerverbands Raumluftechnische Geräte e. V.

### ***1. Aufgabenstellung***

Die TGA Repräsentanz in Berlin benötigt ein Gutachten zur Bezifferung des Potenzials der CO<sub>2</sub>-Einsparung und zur CO<sub>2</sub>-Intensität von Wärmerückgewinnungssystemen Raumluftechnischer Geräte, welche in Nicht-Wohngebäuden (NWG) in Deutschland eingesetzt werden. Als CO<sub>2</sub>-Intensität wird das spezifische Verhältnis der netto CO<sub>2</sub>-Einsparung durch eine Maßnahme bezogen auf die dafür benötigte Investition verstanden. Dabei kann die Bilanzgrenze auf den Investitionsvorgang, oder aber über den Lebenszyklus gezogen werden. In diesem Fall sind neben den reinen Investitionskosten auch die Betriebskosten und Einsparungen während des Lebenszyklus zu berücksichtigen.

### ***2. Definition der Wärmerückgewinnung in der Raumluftechnik in NWG***

Wärmerückgewinnung (WRG) ist ein Sammelbegriff für Verfahren zur Wärmeübertragung und damit zur Wiedernutzbarmachung von thermischer Energie in einem Prozess mit mindestens zwei Massenströmen (Außen- und Fortluft), die unterschiedliche Temperaturniveaus besitzen. Ziel der Wärmerückgewinnung ist die Minimierung des Primärenergiebedarfs zur Luftkonditionierung. Wärmerückgewinnung ist damit die Nutzung der vorhandenen Enthalpie eines Fortluft- oder Außenluftstromes (Wärme oder Kälte) in Verbindung mit einem WRG-System (Wärmeübertrager). Durch die Minderung des Primärenergiebedarfs mittels des Betriebs der WRG können im Gegenzug nicht nur die fossilen Wärme- und Kälteenergien verringert, sondern auch die ansonsten benötigten Produktionssysteme zur Wärme- und Kälteerzeugung zur Luftkonditionierung mit deutlich geringerer Leistung dimensioniert werden. Im Gegensatz zu Wohngebäuden werden in Nicht-Wohngebäuden wesentlich größere WRG-Systeme mit höheren Luftmengen und einer insgesamt

© Umwelt-Campus Birkenfeld 2019 Seite 1 von 12

höheren energetischen Bedeutung eingesetzt. In NWG ist der Einsatz von RLT-Anlagen auch gebräuchlicher als in Wohngebäuden. Laut Studie für die europäischen Kommission wird zusammenfassend das jährliche Einsparpotenzial der RLT an Primärenergie im Jahr 2025 mit rund 448 PJ in Wohngebäuden (14,6 %) und mit rund 2.630 PJ in Nicht-Wohngebäuden (85 %) abgeschätzt<sup>1</sup>. Weiterhin werden laut dieser Studie EU-weit 24 % der Wohngebäude mechanisch belüftet. Lediglich 1,5 % der Wohngebäude verfügten 2012 über eine WRG, während Nichtwohngebäude zu 40 % mechanisch belüftet werden. Davon nur 15 % mit kombinierten Zu- und Abluftanlagen mit der Möglichkeit zur WRG. Die Hälfte dieser Zu- und Abluftanlagen (7 %) wurde mit WRG ausgestattet. Diese Zahlen sind nicht zu 100 % auf Deutschland übertragbar, aber laut Studie des UCB aus 2013<sup>2</sup> ist diese Größenordnung plausibel.

### **3. Wärmerückgewinnung aus Nicht-Wohngebäuden in Deutschland**

Für Deutschland existieren präzise Marktdaten zu Raumluftechnischen Geräten, welche jedes Jahr durch den Herstellerverband Raumluftechnische Geräte e. V. statistisch erhoben werden. Des Weiteren wurden in den Jahren 2014<sup>3</sup> und 2018 durch den Umwelt-Campus Birkenfeld (UCB) bereits mehrere Studien zu den spezifischen Markt- und Effizienzdaten von RLT-Geräten erstellt. Dabei stellen sich folgende Marktdaten dar:

Der Anteil des Herstellerverbands am Gesamtumsatz von zentralen RLT-Geräten Deutschlands liegt nach Abschätzung des Umwelt-Campus Birkenfeld bis 2018 bei 70 % bis 75 % (70 % nach Dissertation Beck, Universität Kassel<sup>4</sup>).

Das Marktvolumen an RLT-Geräten wird durch den Herstellerverband wie folgt beziffert:

- 2017 wurden in Deutschland 20.375 RLT-Geräte ausgeliefert.
- 2018 stieg die Anzahl der gelieferten Geräte auf 23.419 Einheiten<sup>5</sup>, jedoch werden nachfolgend die Werte aus 2017 verwendet, da die zur Berechnung benötigten Effizienzwerte nur für 2017 vorliegen.
- unter Berücksichtigung des aktuellen Marktanteils von 70 % ergeben sich damit für das Betrachtungsjahr 2017 insgesamt 29.107 gelieferte Einheiten.

Da nur Zu- und Abluftgeräte systembedingt mit einer WRG ausgestattet werden können, ergibt sich bei einem Anteil von 80,5 % eine zu betrachtende Anzahl von 23.431 WRG-Systemen, die 2017 in RLT-Geräten in Deutschland ausgeliefert wurden. 13,6 % der Geräte sind als reine Zuluft-

<sup>1</sup> Lot 6 Study, Draft Working Document Ventilation Units 10.10.2012

<sup>2</sup> Kaup, C., Kampeis, P., Studie zum Beitrag und zum Anteil der Wärmerückgewinnung aus zentralen Raumluftechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) in Nicht-Wohngebäuden, 2013

<sup>3</sup> Studie zur Entwicklung des Energiebedarfs zentraler Raumluftechnischer Anlagen in Nicht-Wohngebäuden in Deutschland, Fachverband Gebäude-Klima e. V. und Herstellerverband Raumluftechnische Geräte e. V., 2014

<sup>4</sup> Entwicklung der Wärmerückgewinnung in Deutschland, Springer-VDI-Verlag, HLH 10/2018

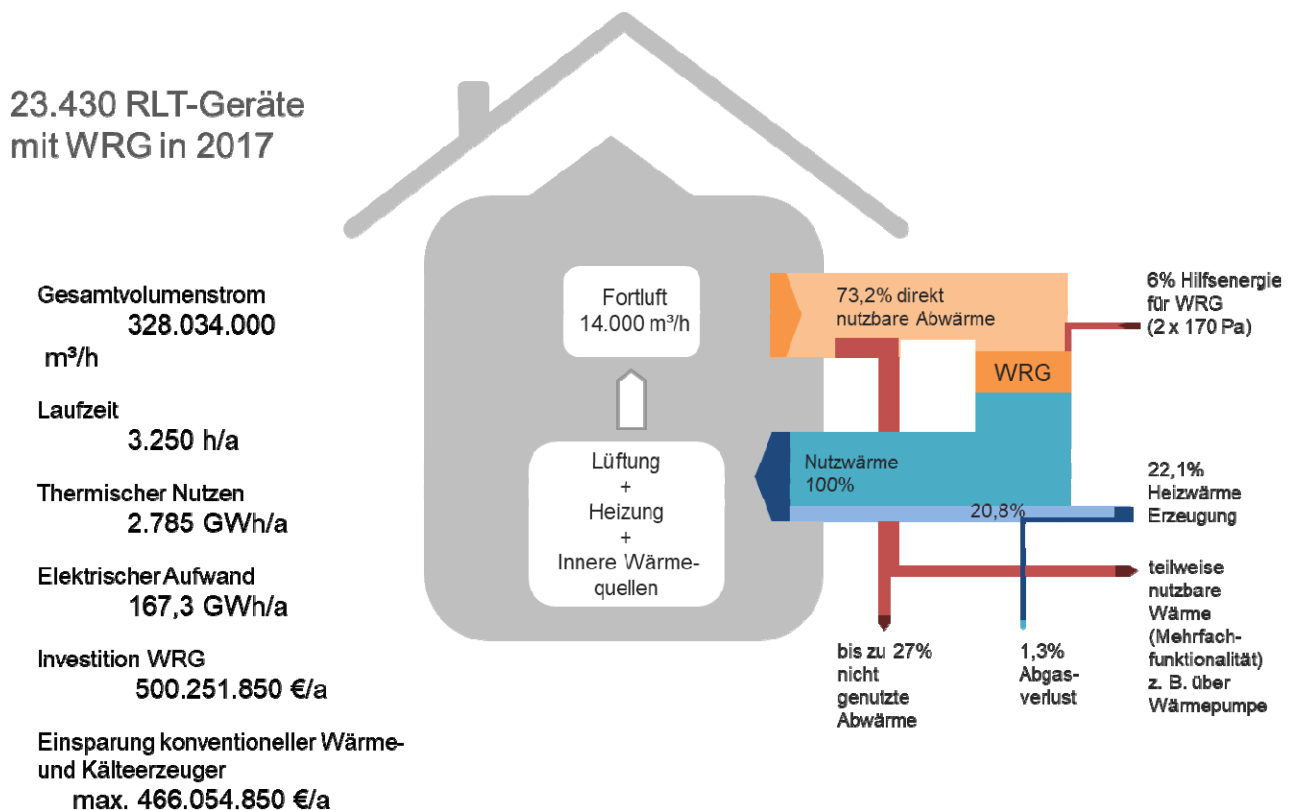
<sup>5</sup> Mitgliederbefragung der Mitglieder des Herstellerverbandes Raumluftechnische Geräte e. V. 2009 bis 2017 und 2018

geräte und 5,9 % der Geräte sind als reine Abluftgeräte einzustufen, welche systembedingt nicht mit WRG-Systemen ausgestattet werden können<sup>6</sup>.

Der mittlere Volumenstrom der Anlagen lag 2017 bei rund 14.000 m<sup>3</sup>/h. Der mittlere Differenzdruck der Anlagen lag bei 169,5 Pa sowohl für die Zuluft- als auch für die Abluftseite<sup>7</sup>.

Damit ergibt sich ein Gesamtvolumenstrom von 328.034.000 m<sup>3</sup>/h (jeweils für Zu- und Abluft) der 2017 in Deutschland installiert wurde und grundsätzlich die Nutzung einer WRG ermöglicht.

Wenn ein spezifischer Energiebedarf für Wärme von 11,6 kWh/(m<sup>3</sup>/h)/a<sup>8</sup> bei 3.250 h/a<sup>9 10</sup> Betriebsdauer berücksichtigt wird, ergibt sich eine Wärmearbeit von 3.805 GWh/a (328.034.000 m<sup>3</sup>/h multipliziert mit 11,6 kWh/(m<sup>3</sup>/h)/a). Der durchschnittliche Übertragungsgrad der WRG-Systeme lag im Jahr 2017 in Deutschland bei 0,732<sup>11</sup>. Damit ergibt sich eine zurückgewonnene Wärmearbeit von 2.785 GWh/a für die in 2017 installierten Anlagen.



**Abbildung 1: Nutzung und Aufwand der Wärmerückgewinnung in NWG in Deutschland**

<sup>6</sup> Studie des Umwelt-Campus Birkenfeld, Energieeffizienz von RLT-Geräten, TGA Fachplaner 03/2010

<sup>7</sup> Entwicklung der Wärmerückgewinnung in Deutschland, Springer-VDI-Verlag, HLH 10/2018

<sup>8</sup> Bezogen auf 8,4 kWh/(m<sup>3</sup>/h)/a bei 2.350 h/a Beck, E., Energieverbrauch, -einsparpotential und- grenzwerte von Lüftungsanlagen, Dissertation, Universität Kassel, 2000

<sup>9</sup> DIN 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden — Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung — Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Tabelle 4 (Büroräume)

<sup>10</sup> In der Praxis können auch höhere Laufzeiten auftreten, so liegen diese vor allem in Reinräumen oder Räumen des Gesundheitswesens bis zu 8.760 h/a

<sup>11</sup> Entwicklung der Wärmerückgewinnung in Deutschland, Springer-VDI-Verlag, HLH 10/2018

Akademisch richtig wäre es hier den Deckungsgrad der WRG statt des Übertragungsgrades anzuwenden, der allerdings von den Sollwerten der Anlage abhängig ist. Aus diesem Grund wird vereinfachend der Übertragungsgrad der WRG verwendet.

Weiterhin kann für den tatsächlich geförderten Volumenstrom im Mittel ein Teillastfaktor angewendet werden, der nach DIN V 18599 Teil 10 Tabelle 5<sup>12</sup> je nach Anwendungsfall bei 0,5 bis 1,0 liegt. Da der Einfluss der tatsächlich geförderten Luftmenge, sowohl auf die Energiekosten, als auch auf die CO<sub>2</sub>-Einsparung ein etwa gleich großen Gewicht haben, wurde im Weiteren zunächst darauf verzichtet mit einem Teillastfaktor von z. B. 0,8 zu rechnen. In der Zusammenfassung werden allerdings die spezifischen Werte mit Teillastfaktor 0,8 angegeben, die nach dem gleichen Verfahren berechnet wurden.

Der elektrische Aufwand, bedingt durch den luftseitigen Druckabfall der WRG, berechnet sich mit 51.483 KW (91.121 m<sup>3</sup>/s multipliziert mit 2 mal 169,5 Pa bei einem angenommenen Systemwirkungsgrad der elektrischen Antriebe von 0,6<sup>13</sup>). Damit errechnet sich eine elektrische Arbeit von 167.320 MWh/a (bei 3.250 h/a), die notwendig ist, um die Druckverluste der in 2017 installierten WRG-Systeme zu überwinden.

Der Preis einer durchschnittlichen WRG ergab sich aus der Analyse des UCB 2018 von rund 5.000 marktbezogenen Geräteauslegungen mit 21.350 € pro WRG (Mittelwert). Diese Preise sind Bruttopreise einschließlich der benötigten Hilfsbaugruppen (z. B. Gerätegehäuse, etc.) und stellen einen realistischen Endnutzer-Preis dar.

#### **4. Spezifische Energiepreise und Emissionsfaktoren in Deutschland**

In Deutschland wird Nutzwärme mittels verschiedener Energieträger erzeugt. Verwendung finden in Nichtwohngebäuden (meist Gewerbebauten) zu 52,7 % Gas, zu 22,2 % Erdöl, zu 13,8 % erneuerbare Energieträger und zu 7,6 % Fernwärme. Strom (3,0 %) und Kohle (0,6 %) tragen am geringsten zur Wärmeerzeugung bei<sup>14</sup>. Mit dieser Verteilung ergibt sich ein gewichteter mittlerer Energiepreis (Erzeugung) von 6,2 Cent/kWh. Dieser berechnet sich für Deutschland aus 9,1 Cent/kWh für Öl (22,2 % Anteil), 4,5 Cent/kWh für Gas (52,8 % Anteil), 10,1 Cent/kWh für Fernwärme (7,6 % Anteil) und 3,8 Cent/kWh für erneuerbare Energieträger (13,8 % Anteil) sowie 16,4 Cent/kWh für Strom (3,0 %) und 8 Cent/kWh für Kohle (0,6 %) <sup>15</sup>. Zusätzlich müssen Verteil- und

<sup>12</sup> DIN V 18599-10:2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten

<sup>13</sup> DIN EN 13053: Lüftung von Gebäuden - Zentrale Raumluftechnische Geräte - Leistungsdaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten; Deutsche Fassung EN 13053:2012-02

<sup>14</sup> [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/6\\_datentabelle-zur-abb\\_energieverbrauch-sektor-hgd-waermezwecke\\_2018-02-14.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/6_datentabelle-zur-abb_energieverbrauch-sektor-hgd-waermezwecke_2018-02-14.pdf)

<sup>15</sup> [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=38](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?__blob=publicationFile&v=38)

Erzeugungsverluste berücksichtigt werden. Diese liegen nach DIN SPEC 15420 Tabelle 13<sup>16</sup> (70 °C Vorlauftemperatur) bei 35 %. Damit ergibt sich letztlich ein Preis für Nutzwärme von 8,4 Cent/kWh (6,2 Cent/kWh x 1,35). Die elektrische Energie zur Überwindung der Druckverluste der WRG wird in Deutschland mit 16,4 Cent/kWh (Basis 2018)<sup>17</sup> bewertet.

Zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren<sup>18</sup> wird Gas mit 0,202 kg eCO<sub>2</sub>/kWh, Öl mit 0,315 kg eCO<sub>2</sub>/kWh, erneuerbare Energieträger mit 0,030 kg eCO<sub>2</sub>/kWh, Fernwärme mit 0,341 kg eCO<sub>2</sub>/kWh, Strom mit 0,520 kg eCO<sub>2</sub>/kWh (Strommix Inlandsverbrauch) und Kohle mit 0,429 kg eCO<sub>2</sub>/kWh berücksichtigt. Hiermit ergibt sich für den Wärmemix ein Emissionsfaktor von 0,225 kg eCO<sub>2</sub>/kWh. Unter Berücksichtigung der Verteilverluste von 35 % liegt entsprechend die Emission bezogen auf Nutzwärme bei 0,303 kg eCO<sub>2</sub>/kWh.

### **5. Erweiterte Bilanzgrenze**

Bei der energetischen und wirtschaftlichen Betrachtung der WRG-Systeme ist es von besonderer Bedeutung, wann, wo und wie die Bilanzgrenze für die Beurteilung gezogen wird. Innerhalb der Bilanzgrenze wird der Nutzen einer WRG im Vergleich zur Technik ohne WRG bewertet. Die Bilanzgrenze wurde für die folgenden Berechnungen so festgelegt, dass die WRG und alle davon beeinflussten Energieströme, Anlagenteile sowie die baulichen Rahmenbedingungen einbezogen wurden.

Die Bilanzgrenze kann dabei wie folgt gezogen werden:

- über das gesamte Gebäude mit sämtlichen Auswirkungen der WRG, wie z. B. Reduktion der Wärme- oder Kälteerzeugung etc.
- über die raumluftechnische Anlage als vereinfachte Bilanzgrenze (Vergleich mit und ohne WRG)
- über die WRG selbst, ohne weitere Einflüsse der Anlage oder des Gebäudes

Die Erweiterung der Bilanzgrenze über das gesamte Gebäude setzt allerdings voraus, dass die Eingriffsmöglichkeit in angrenzende Gewerke gegeben ist. Sind im Bestand Wärmeerzeugungsanlagen und/oder Kälteanlagen bereits ohne Berücksichtigung einer WRG installiert worden oder erfolgt ein ganzheitlicher Ansatz in der Planung nicht oder zu spät, kann dieser zusätzliche Effekt durch die WRG nicht genutzt und auch nicht angesetzt werden, da die Auswirkungen dann nicht mehr realisiert werden können. Die gezogene Bilanzgrenze gestattet eine konsistente Betrachtung hinsichtlich Kennzahlen, Energieströmen, Umweltschutz und Wirtschaftlichkeit (Investitions-, Substitutions- sowie Betriebskosten).

<sup>16</sup> DIN SPEC 15240:2018-08 - Entwurf: Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Energetische Inspektion von Klimaanlage, Ausgabedatum 2018-08

<sup>17</sup> [https://www.bdew.de/media/documents/190723\\_BDEW-Strompreisanalyse\\_Juli-2019.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/190723_BDEW-Strompreisanalyse_Juli-2019.pdf), Seite 24

<sup>18</sup> <https://www.kea-bw.de/service/emissionsfaktoren/>

Zur Bemessung der Einsparung an Wärme- und Kälteerzeugung müssen spezifische Werte vorliegen, mit denen die Änderung der Wärme- und/oder Kälteerzeugungsanlagen bewertet werden können. Diese wurden bereits in einer Publikation des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) im Jahr 2012 zu Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zur EnEV 2012 ermittelt<sup>19</sup>. Da Wärme- und/oder Kälteerzeugungsanlagen durch die WRG nur teilweise substituiert werden können, werden die Medienleitungen weiterhin erforderlich sein. Da der Aufwand für Medienleitungen vom Anwendungsfall abhängig ist und die Änderungen im Durchmesser nicht wesentlich sind, wird die Änderung des Verteilnetzes nicht weiter berücksichtigt. Auch werden die Änderungen bei Abgasleitungen, Ausdehnungsgefäßen etc. nicht betrachtet. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Datenerhebung als durchschnittliche Investitionskosten in €/kW zu verschiedenen Wärmeerzeugern im Leistungsbereich bis 500 KW dargestellt.

Da die BMVBS-Publikation im Jahr 2012 veröffentlicht wurde, werden die verwendeten Daten (Basis 2009) mit der durchschnittlichen Preisentwicklung (1,4 % Inflationsrate 2009 bis 2017<sup>20</sup>) auf das Niveau 2017 (1,014<sup>8</sup>) hochgerechnet. Zur Vereinfachung wird im Folgenden auf den Gas-Brennwertkessel Bezug genommen. Der Ansatz ist konservativ gewählt.

**Tabelle 1: Investitionskosten für Wärmeerzeugungsanlagen in Abhängigkeit von der Wärmeleistung<sup>21</sup>**

Leistungsbereich	[KW]	50	100	150	200	250	300	500
<b>Gas-Brennwert</b>	<b>€/KW</b>	<b>120</b>	<b>100</b>	<b>90</b>	<b>90</b>	<b>80</b>	<b>60</b>	<b>60</b>
Öl-Brennwert	€/KW	110	160	120	100	110	90	100
Holzpellets	€/KW	390	340	250	200	180	180	150
Hackschnitzel	€/KW	480	284	229	221	194	180	122
Fernwärmeübergabe	€/KW	90	60	50	50	40	40	30
Mittelwert	€/KW	238	189	148	132	121	110	92
<b>Gas-Brennwert korr.</b>	<b>€/KW</b>	<b>133</b>	<b>111</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>89</b>	<b>66</b>	<b>66</b>
Mittelwert korr.	€/KW	263	209	164	146	134	122	102

Tabelle 1 zeigt die Entwicklung des korrigierten Mittelwertes aller Wärmeerzeuger und den korrigierten Wert €/KW pro KW des Gas-Brennwertkessels im Bereich von 50 bis 500 KW.

Bei Kälteerzeugungsanlagen wurden Rückkühlwerke, Pufferspeicher, Ausdehnungsgefäße, Pumpen, Armaturen und Zubehör sowie Verteilkreise ebenfalls nicht berücksichtigt.

<sup>19</sup> BMVBS-Online-Publikation, Ermittlung von spezifischen Kosten energiesparender Bauteil-, Beleuchtungs-, Heizungs- und Klimatechnikausführungen bei Nichtwohngebäuden für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zur EnEV 2012, 06/2012

<sup>20</sup> <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156285/umfrage/entwicklung-der-inflationsrate-in-der-eu-und-der-eurozone/>

<sup>21</sup> BMVBS-Online-Publikation, Ermittlung von spezifischen Kosten energiesparender Bauteil-, Beleuchtungs-, Heizungs- und Klimatechnikausführungen bei Nichtwohngebäuden für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zur EnEV 2012, 06/2012, berechnet über Polynom mit  $y = 0,0004x^2 - 0,3545x + 147,29$  (Gas-Brennwert)



In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Datenerhebung zu verschiedenen Kaltwassersätzen im Leistungsbereich bis 1.500 KW dargestellt. Die verwendeten Mittelwerte werden ebenfalls auf den aktuellen Zeitpunkt 2017 preisbereinigt (siehe Zeile Korr. Mittelwerte).

**Tabelle 2: Investitionskosten für Kaltwassersätze in Abhängigkeit von der Kälteleistung<sup>22</sup>**

Leistungsbereich	[KW]	125	250	500	750	1.000	1.250	1.500
Kolbenverdichter	[€/KW]	180	140	120	100	90	90	-
Schraubenverdichter	[€/KW]	-	-	90	90	80	60	60
Turboverdichter	[€/KW]	-	-	-	110	100	100	90
verwendete Mittelwerte	[€/KW]	180	140	110	105	90	85	75
<b>Korr. Mittelwerte</b>	<b>[€/KW]</b>	<b>199</b>	<b>155</b>	<b>122</b>	<b>116</b>	<b>100</b>	<b>94</b>	<b>83</b>

Die Rückkühlung der Kältemaschinen muss zusätzlich betrachtet werden. Da zur statistischen Betrachtung der Bilanzgrenze nicht klar sein kann, welche Art der Rückkühlung verwendet wird, wird im Folgenden der Mittelwert aus allen spezifischen Werten verwendet (siehe Tabelle 3).

**Tabelle 3: Investitionskosten für verschiedene Arten von Rückkühlwerken (RKW) in Abhängigkeit von der Kälteleistung<sup>23</sup>**

Leistungsbereich	[KW]	200	500	1.000	2.000
geschlossenes RKW	[€/KW]	123	96	84	81
offenes RKW	[€/KW]	54	33	27	22
Hybridkühler	[€/KW]	251	242	235	235
Trockenkühler		165	165	164	164
verwendete Mittelwerte	[€/KW]	148	134	128	126
<b>Korr. Mittelwerte</b>	<b>[€/KW]</b>	<b>164</b>	<b>148</b>	<b>141</b>	<b>139</b>

In Summe ergeben sich damit folgende Werte für die Kälteerzeugung (KWS) und Rückkühlwerk (RKW) (siehe Tabelle 4).

**Tabelle 4: Investitionskosten für die Kälteversorgung (Mittelwerte Tabelle 2 und 3) in Abhängigkeit von der Kälteleistung<sup>24</sup>**

Leistungsbereich	[KW]	100	200	500	1.000	1.500
Mittelwert KWS	[€/KW]	190	174	122	100	83
Mittelwert RKW	[€/KW]	167	164	148	141	140
<b>verwendete Summenwerte</b>	<b>[€/KW]</b>	<b>357</b>	<b>338</b>	<b>270</b>	<b>241</b>	<b>223</b>

<sup>22</sup> Ebenda

<sup>23</sup> Ebenda

<sup>24</sup> Ebenda, berechnet über Polynome mit  $y = 7E-05x^2 - 0,1789x + 206,93$  (KWS) und  $y = 2E-05x^2 - 0,048x + 171,37$  (RKW)



Der Mittelwert der Einsparungen ergibt sich für einen mittleren Standort in Deutschland (Mannheim) mit 9.975 € (durch WRG substituierte Wärmezeugung 86 KW bewertet mit 116 €/KW) und mit 9.904 € (durch WRG substituierte Kälteerzeugung 27,7 KW bewertet mit 357 €/KW einschl. Rückkühlwerk). In Summe können damit durch die WRG 19.879 € angrenzende Investitionskosten zur Erwärmung und Kühlung der Luft (93 % der Investitionssumme der WRG) eingespart werden. Somit beträgt die tatsächliche Mehrinvestition der WRG nur noch 1.471 € (21.350 € WRG Investition abzüglich 19.879 € eingesparte Kosten für Wärme- und Kälteerzeugung), wenn die Bilanzgrenze umfassend gezogen werden kann.

### **6. Monetäre und ökologische Bewertung**

Der Nutzen der in 2017 installierten WRG-Systeme errechnet sich in Deutschland mit 233.973.793 €/a (2.785 GWh/a bewertet mit 8,4 Cent/kWh) für Wärme. Hierzu ist ein Gesamtinvestitionsaufwand von netto 34.467.000 € (23.431 Einheiten multipliziert mit 1.471 €) notwendig. Zudem bedarf es für die benötigte elektrische Energie 27.440.500 €/a (51.483 KW multipliziert mit 3.250 h/a bewertet mit 16,4 Cent/KWh) zum Betrieb der WRG-Systeme. Die Investition für die WRG muss als Annuität berücksichtigt werden. Dazu werden als Lebensdauer 15 Jahre angenommen. Abgezinst mit einem durchschnittlichen Zinssatz von 2,2 % (Nominalzins Mittelwert 2009 bis 2017<sup>25</sup>) ergibt sich damit ein Barwert von 12,63. Somit beträgt der Investitionsaufwand 2.729.460 €/a (Annuität der Investition mit 34.467.000 € geteilt durch den Barwert von 12,63).

Hierdurch ergibt sich eine Gesamteinsparung von 203.739.691 €/a, die sich aus 233.973.793 €/a (Wärmegegewinne) abzüglich 27.440.500 €/a (Elektroenergieaufwand) abzüglich 2.729.460 €/a (Annuität der Investition) abzüglich 64.142 €/a (Instandhaltungsaufwand) berechnet. Mit der tatsächlichen Investition von 2.729.460 €/a werden letztlich Gewinne von 203.739.691 €/a erwirtschaftet. Der wirtschaftliche (monetäre) Hebel liegt damit bei 74,64 € Einsparung pro € Investitionsaufwand. Ökologisch bewertet liegt die CO<sub>2</sub>-Einsparung der in 2017 ausgelieferten Anlagen, die voraussichtlich in 2018 in Betrieb genommen wurde, bei 843.976.897 kg eCO<sub>2</sub>/a (2.785 GWh/a multipliziert mit 0,303 kg eCO<sub>2</sub>/kWh). Demgegenüber steht ein CO<sub>2</sub>-Aufwand durch Elektroenergie von 87.006.462 kg eCO<sub>2</sub>/a (167.320.120 kWh/a multipliziert mit 0,52 kg eCO<sub>2</sub>/kWh) und ein Aufwand zur Herstellung der WRG mit 1.148.900 kg eCO<sub>2</sub>/a (34.467.000 € multipliziert mit 0,5 kg eCO<sub>2</sub>/€<sup>26,27</sup> bezogen auf 15 Nutzungsjahre), sowie ein Aufwand für die Instandhaltung von 14.111 kg eCO<sub>2</sub>/a (64.142 € multipliziert mit 0,22 kg eCO<sub>2</sub>/€).

<sup>25</sup> Das Dokument mit dem GZ II A 3 – H 1012-10/07/0001 wird regelmäßig aktualisiert und enthält den vorgeschriebenen Kalkulationszinssatz; (Stand 2018, Veröffentlichungsdatum 14. Mai 2018):

<sup>26</sup> An Environmentally Extended Input-Output Analysis to Support Sustainable Use of Forest Resources, Table 3, Tuomas Mattila, Pekka Leskinen, Ilmo Mäenpää and Jyri Seppälä, The Open Forest Science Journal, 2011, 4, 15-23

<sup>27</sup> Carbon footprint decomposition in MRIO models: identifying EU-supply chain hot-spots and their structural changes over time, Table 1, Hanspeter WIELAND, Stefan GILJUM, Universität Wien, Working Paper Series Nr. 13, 2/2016

Über die Nutzungsdauer von 15 Jahren ergibt sich somit für die jährlich installierten WRG-Systeme eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von 12.659.653 to. eCO<sub>2</sub>. Dem steht ein CO<sub>2</sub>-Aufwand von 1.305.097 to. eCO<sub>2</sub> für die elektrische Energie zum Betrieb der WRG-Systeme und 17.234 to. eCO<sub>2</sub> für die Herstellung der Systeme, sowie 405 to. eCO<sub>2</sub> für die Wartung und Instandhaltung der Systeme gegenüber. Damit errechnet sich eine Netto-CO<sub>2</sub>-Einsparung von 11.336.918 to. eCO<sub>2</sub>.

In Bezug auf die Gesamtinvestition der WRG-Systeme (ohne Berücksichtigung der Betriebskosten und Einsparungen) ergibt sich somit eine CO<sub>2</sub>-Intensität von 328,9 kg eCO<sub>2</sub>/€ (11.336.918 to. eCO<sub>2</sub> bezogen auf eine Investition von netto 34.467.000 €).

Werden neben den reinen Investitionskosten auch die Betriebskosten und Energieeinsparungen während des Lebenszyklus durch die WRG berücksichtigt, ergibt sich über die Lebensdauer eine Gesamteinsparung von 2.874.683.340 € (energetischer Nutzen 3.296.690.747 € abzüglich Aufwendungen 386.636.641 € (Elektroenergie) abzüglich 903.765 € (Instandhaltung) bewertet mit einem Barwertfaktor von 14,09 mit Berücksichtigung der Preissteigerung (1,4 %) abzüglich der Investition von 34.467.000 €).

In Bezug auf die Gesamtinvestition der WRG-Systeme (mit Berücksichtigung der Betriebskosten und Einsparungen) ergibt sich somit eine CO<sub>2</sub>-Intensität von -3,94 kg eCO<sub>2</sub>/€ (11.336.918 to. eCO<sub>2</sub> bezogen auf eine Investition (Gesamteinsparung) von netto -2.874.683.340 €).

### **7. CO<sub>2</sub>-Intensität mit Berücksichtigung der Minderinvestition für die Wärmeversorgung und Kälteerzeugung (ohne RKW)**

Wird die erweiterte Bilanzgrenze nur teilweise berücksichtigt und als Investition 21.350 € pro WRG-Einrichtung nur mit Abzug der Minderung der Wärmeerzeugungsanlagen (9.975 €) und der Kälteerzeugung ohne Berücksichtigung eines Rückkühlwerkes (5.271 €) angesetzt, ergibt sich eine CO<sub>2</sub>-Intensität von 78,88 kg eCO<sub>2</sub>/€. Der monetäre Hebel liegt bei 17,21 € Einsparung pro € Investitionsaufwand (ohne weitere Berücksichtigung der Betriebskosteneinsparungen über die Lebensdauer).

Werden neben den reinen Investitionskosten auch die Betriebskosten und Energieeinsparungen während des Lebenszyklus durch die WRG berücksichtigt, ergibt sich über die Lebensdauer eine Gesamteinsparung von 2.763.281.056 € (energetischer Nutzen 3.296.690.747 € abzüglich Aufwendungen 386.636.641 € (Elektroenergie) abzüglich 3.750.226 € (Instandhaltung) bewertet mit einem Barwertfaktor von 14,09 mit Berücksichtigung der Preissteigerung (1,4 %) abzüglich der Investition von 143.022.824 €).

In Bezug auf die Gesamtinvestition der WRG-Systeme (mit Berücksichtigung der Betriebskosten und Einsparungen) ergibt sich somit eine CO<sub>2</sub>-Intensität von -4,08 kg eCO<sub>2</sub>/€ (11.281.365 to. eCO<sub>2</sub> bezogen auf eine Investition (Gesamteinsparung) von netto -2.763.281.056 €).

### **8. CO<sub>2</sub>-Intensität mit Berücksichtigung der Minderinvestition für die Wärmeversorgung (ohne Kälteerzeugung)**

Wird die erweiterte Bilanzgrenze nur teilweise berücksichtigt und als Investition 21.350 € pro WRG-Einrichtung nur mit Abzug der Minderung der Wärmeerzeugungsanlagen (9.975 €) angesetzt, ergibt sich eine CO<sub>2</sub>-Intensität von 42,09 kg eCO<sub>2</sub>/€. Der monetäre Hebel liegt dann bei 8,76 € Einsparung pro € Investitionsaufwand (ohne Berücksichtigung der Betriebskosten und Einsparungen).

Werden neben den reinen Investitionskosten auch die Betriebskosten und Energieeinsparungen während des Lebenszyklus durch die WRG berücksichtigt, ergibt sich über die Lebensdauer eine Gesamteinsparung von 2.636.537.815 € (energetischer Nutzen 3.296.690.747 € abzüglich Aufwendungen 386.636.641 € (Elektroenergie) abzüglich 6.988.666 € (Instandhaltung) bewertet mit einem Barwertfaktor von 14,09 mit Berücksichtigung der Energiepreissteigerungen abzüglich der Investition von 266.527.625 €).

In Bezug auf die Gesamtinvestition der WRG-Systeme (mit Berücksichtigung der Betriebskosten und Einsparungen) ergibt sich somit eine CO<sub>2</sub>-Intensität von -4,25 kg eCO<sub>2</sub>/€ (11.218.161 to. eCO<sub>2</sub> bezogen auf eine Investition (Gesamteinsparung) von netto -2.636.537.815 €).

### **9. CO<sub>2</sub>-Intensität ohne Berücksichtigung der Minderinvestitionen Wärme- und Kälteerzeugung**

Wird die erweiterte Bilanzgrenze nicht berücksichtigt und als Investition 21.350 € pro WRG-Einrichtung ohne Abzug der Minderung der Wärme- und/oder Kälteerzeugungsanlagen angesetzt, ergibt sich eine CO<sub>2</sub>-Intensität von 22,19 kg eCO<sub>2</sub>/€. Der monetäre Hebel liegt bei 4,19 € Einsparung pro € Investitionsaufwand.

Werden neben den reinen Investitionskosten auch die Betriebskosten und Energieeinsparungen während des Lebenszyklus durch die WRG berücksichtigt, ergibt sich über die Lebensdauer eine Gesamteinsparung von 2.396.685.067 € (energetischer Nutzen 3.296.690.747 € abzüglich Aufwendungen 386.636.641 € (Elektroenergie) abzüglich 13.117.189 € (Instandhaltung) bewertet mit einem Barwertfaktor von 14,09 mit Berücksichtigung der Preissteigerung (1,4 %) abzüglich der Investition von 500.251.850 €).

In Bezug auf die Gesamtinvestition der WRG-Systeme (mit Berücksichtigung der Betriebskosten und Einsparungen) ergibt sich somit eine CO<sub>2</sub>-Intensität von -4,63 kg eCO<sub>2</sub>/€ (11.098.553 to. eCO<sub>2</sub> bezogen auf eine Investition (Gesamteinsparung) von netto -2.396.685.067 €).

## 10. Zusammenfassung

Die CO<sub>2</sub>-Intensität der WRG in Nicht-Wohngebäuden liegt bei reinem Bezug auf die Investitionskosten ohne Berücksichtigung der Energieeinsparungen bei rund **22,2 kg eCO<sub>2</sub>/€**, wenn WRG-Systeme ohne Auswirkung auf die Wärme- und Kälteerzeugung betrachtet werden.

Wird lediglich die Minderung der Wärmeerzeugung berücksichtigt, liegt die CO<sub>2</sub>-Intensität der WRG bei rund **42,1 kg eCO<sub>2</sub>/€**.

Mit einer erweiterten Bilanzgrenze über das gesamte Gebäude liegt die CO<sub>2</sub>-Intensität der WRG bei **328,9 kg eCO<sub>2</sub>/€** und damit deutlich über vergleichbaren Technologien wie der Renovierung der Gebäudehülle oder der Beleuchtung<sup>28</sup>.

**Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse bei Volllast**

	CO <sub>2</sub> -Intensität	CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten	Wirtschaftlicher Hebel Investition zur Einsparung
Nur WRG (Investition <u>ohne</u> Betriebskosteneinsparung) Mit Berücksichtigung	22,2 kg eCO <sub>2</sub> /€	45,05 € / to. eCO <sub>2</sub>	4,19 €/€
- Minderinvestition Wärmeerzeugung	42,1 kg eCO <sub>2</sub> /€	23,76 € / to. eCO <sub>2</sub>	8,76 €/€
- Minderinvestition Wärm- und Kälteerzeugung	78,9 kg eCO <sub>2</sub> /€	12,68 € / to. eCO <sub>2</sub>	17,21 €/€
- Minderinvestition Wärm- und Kälteerzeugung einschl. RKW	328,9 kg eCO <sub>2</sub> /€	3,04 € / to. eCO <sub>2</sub>	74,64 €/€
Nur WRG (Investition <u>mit</u> Betriebskosteneinsparung) Mit Berücksichtigung	-4,63 kg eCO <sub>2</sub> /€	<b>-216,0 € / to. eCO<sub>2</sub></b>	
- Minderinvestition Wärmeerzeugung	-4,25 kg eCO <sub>2</sub> /€	<b>-235,0 € / to. eCO<sub>2</sub></b>	
- Minderinvestition Wärm- und Kälteerzeugung	-4,08 kg eCO <sub>2</sub> /€	<b>-244,9 € / to. eCO<sub>2</sub></b>	
- Minderinvestition Wärm- und Kälteerzeugung einschl. RKW	-3,94 kg eCO <sub>2</sub> /€	<b>-253,6 € / to. eCO<sub>2</sub></b>	

Der reziproke Wert der CO<sub>2</sub>-Intensität ergibt die s. g. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten. Diese liegen für Systeme der Wärmerückgewinnung je nach Wahl der Bilanzgrenze bei 3,04 € pro to. eCO<sub>2</sub> mit Berücksichtigung des Gebäudes (Verringerung der Wärme- und Kälteerzeugung) bis zu 45,05 € pro to. eCO<sub>2</sub>, wenn die WRG für sich alleine betrachtet wird. Wird lediglich die Minderung der Wärmeerzeugung betrachtet, liegen die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten bei 23,75 € pro to. eCO<sub>2</sub>.

Werden neben den Investitionskosten auch die Betriebskosteneinsparungen mit berücksichtigt liegt die CO<sub>2</sub>-Intensität bei rund **-4,6 kg eCO<sub>2</sub>/€**, wenn WRG-Systeme ohne Auswirkung auf die Wärme- und Kälteerzeugung betrachtet werden.

Wird lediglich die Minderung der Wärmeerzeugung berücksichtigt, liegt die CO<sub>2</sub>-Intensität der WRG bei rund **-4,3 kg eCO<sub>2</sub>/€**. Mit einer erweiterten Bilanzgrenze über das Gebäude liegt die CO<sub>2</sub>-Intensität der WRG bei **-3,9 kg eCO<sub>2</sub>/€**.

Mit Berücksichtigung der Energieeinsparung sind die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten für Systeme der Wärmerückgewinnung negativ und liegen je nach Wahl der Bilanzgrenze bei **-254 € pro to. eCO<sub>2</sub>** mit Berücksichtigung des Gebäudes (Verringerung der Wärme- und Kälteerzeugung) bis zu **-216 € pro**

<sup>28</sup> Base: IDAE (2011) Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020  
[https://www.euroheat.org/wp-content/uploads/2016/04/UP-RES\\_M4\\_Energy\\_Demand\\_Reduction\\_Buildings.pdf](https://www.euroheat.org/wp-content/uploads/2016/04/UP-RES_M4_Energy_Demand_Reduction_Buildings.pdf)

to. eCO<sub>2</sub>, wenn die WRG für sich alleine betrachtet wird. Wird lediglich die Minderung der Wärmeerzeugung berücksichtigt, liegen die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten bei **-235 € pro to. eCO<sub>2</sub>**.

Wir neben dem Vollastfall der Teillastfall betrachtet, ergeben sich die Werte gemäß Tabelle 6.

**Tabelle 6: Zusammenfassung der Ergebnisse bei Teillast (durchschnittlich 80 % der Nennluftmenge)**

	CO <sub>2</sub> -Intensität	CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten	Wirtschaftlicher Hebel Investition zur Einsparung
Nur WRG (Investition <u>ohne</u> Betriebskosteneinsparung)	18,27 kg eCO <sub>2</sub> /€	54,73 € / to. eCO <sub>2</sub>	3,31 €/€
Mit Berücksichtigung			
- Minderinvestition Wärmeerzeugung	34,75 kg eCO <sub>2</sub> /€	28,78 € / to. eCO <sub>2</sub>	7,12 €/€
- Minderinvestition Wärm- und Kälteerzeugung	65,19 kg eCO <sub>2</sub> /€	15,34 € / to. eCO <sub>2</sub>	14,15 €/€
- Minderinvestition Wärm- und Kälteerzeugung einschl. RKW	272,10 kg eCO <sub>2</sub> /€	3,67 € / to. eCO <sub>2</sub>	61,93 €/€
Nur WRG (Investition <u>mit</u> Betriebskosteneinsparung)	-4,79 kg eCO <sub>2</sub> /€	<b>-208,7 € / to. eCO<sub>2</sub></b>	
Mit Berücksichtigung			
- Minderinvestition Wärmeerzeugung	-4,31 kg eCO <sub>2</sub> /€	<b>-232,9 € / to. eCO<sub>2</sub></b>	
- Minderinvestition Wärm- und Kälteerzeugung	-4,10 kg eCO <sub>2</sub> /€	<b>-243,9 € / to. eCO<sub>2</sub></b>	
- Minderinvestition Wärm- und Kälteerzeugung einschl. RKW	-3,93 kg eCO <sub>2</sub> /€	<b>-254,3 € / to. eCO<sub>2</sub></b>	

Es wird deutlich, dass sich im Teillastfall (durchschnittlich 80 % der Nennluftmenge) die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten, insbesondere bei Betrachtung des Lebenszyklus fast nicht ändern, da zwar einerseits die Einsparung geringer wird, aber gleichzeitig auch die eingesparte CO<sub>2</sub>-Menge.

Das Gutachten betrachtet eine Lebensdauer von nur 15 Jahren. In der Praxis werden die Systeme aber bis zu 40 Jahre genutzt. Geht man im Mittel von einem Lebenszyklus von 30 Jahren aus verdoppelt sich praktisch die eingesparte CO<sub>2</sub>-Menge üblicherweise von 11,3 Mio. to. eCO<sub>2</sub> auf rund 22 Mio. to. eCO<sub>2</sub>.

Letztlich ergibt sich aus dem Gutachten, dass die Wärmerückgewinnung eine sehr wirtschaftliche und ökologisch sinnvolle Technologie ist. Da WRG in RLT-Anlagen bereits verbindlich mit Mindestrückwärmzahlen gefordert sind, stellt sich die Frage nach der Quintessenz des Gutachtens. Auf Grund der negativen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten während des Lebenszyklus der WRG kann die grundsätzliche Empfehlung zum stärkeren Einsatz von RLT-Anlagen in NWG ausgesprochen werden. Damit wird nicht nur CO<sub>2</sub> eingespart, sowie die gleichzeitig Betriebskosten gesenkt, die Gebäude werden auch mit dem Lebensmittel Luft besser versorgt.

Birkenfeld, 12.11.2019

Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup

Honorary professor for Energy Efficiency  
and Heat Recovery

nachhaltig.  
digital.  
innovativ.

Hochschule Trier  
Umwelt-Campus Birkenfeld

Postfach 13 80  
55761 Birkenfeld

Telefon: +49 6782 17-18 19  
Telefax: +49 6782 17-13 17  
E-Mail: [info@umwelt-campus.de](mailto:info@umwelt-campus.de)

[www.umwelt-campus.de](http://www.umwelt-campus.de)