



CO₂-Vermeidungskosten in der Gebäudetechnik



Zusammenfassung der Studie Professor Franzke

ILK Dresden



Institut für Luft- und Kältetechnik
gemeinnützige Gesellschaft mbH

CO₂-Vermeidung in der Gebäudetechnik – geringe Kosten mit hohen Effekten – ausgewählte Ergebnisse einer Studie

Prof. Dr.-Ing. Uwe Franzke
Geschäftsführer
Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH

Wieviel CO₂ sparen wir ein, wenn Sie alle die nächsten 20 Minuten auf das Atmen verzichten?



Quelle: K. Müller: Der klimatisierte Mitarbeiter

 Umwelt-Campus
Birkenfeld

H O C H
S C H U L e:
T R I E R

HOWATHERM II

EBC | Institute for Energy Efficient
Buildings and Indoor Climate



RWT AACHEN
UNIVERSITY

ILK Dresden 

Inhalt der Studie:

- Wärmerückgewinnung in raumluftechnischen Anlagen in Nichtwohngebäuden
- Variable Volumenstromregelung und Erhöhung des Ventilatorwirkungsgrades (Büro- und Verwaltungsgebäude)
- Klimakälte (Büro- und Verwaltungsgebäude)

Effekte zur Ökologie und Wirtschaftlichkeit durch:

- Energieerzeugung zur Luftkonditionierung in zentralen RLT-Anlagen
 - Elektro
 - Wärme
 - Kälte
- Treibhauseffekt als CO₂-Äquivalent durch Kältemittel

Gliederung

- Politische Rahmenbedingungen
- Anlass und Motivation
- Vorgehensweise
- Marktdaten
- Ökologische und ökonomische Randbedingungen
- Ergebnisse der Technologien
- Hochrechnung auf den Bestand
- Fazit

Entwurf Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)

§ 3 Nationale Klimaschutzziele

- (1) Die Treibhausgasemissionen werden im Vergleich zum Jahr 1990 schrittweise gemindert:
 - (1) mindestens 40 Prozent bis zum Jahr 2020,
 - (2) um mindestens 55 Prozent bis zum Jahr 2030,
 - (3) um mindestens 70 Prozent bis zum Jahr 2040,
 - (4) um mindestens 95 Prozent bis zum Jahr 2050.

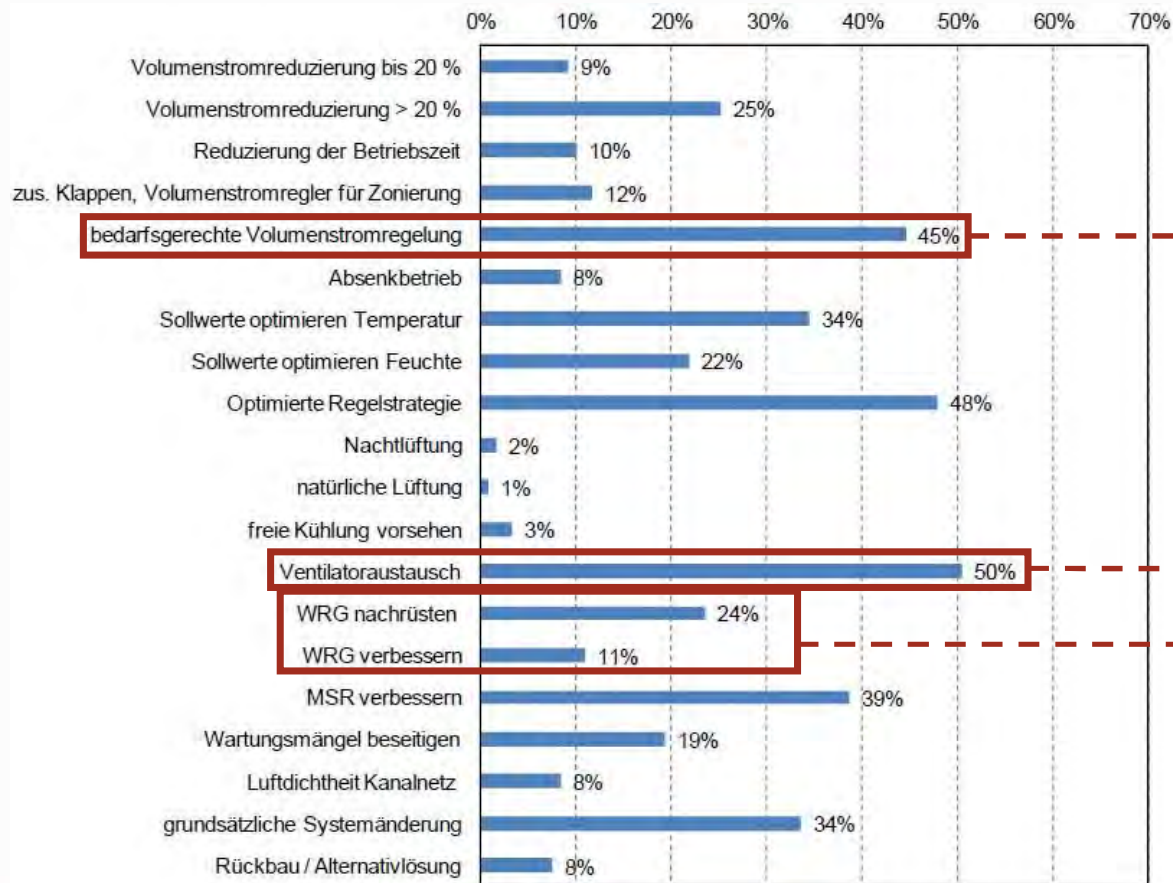
- (2) Darüber hinaus soll bis zum Jahr 2050 ein Gleichgewicht zwischen verbleibenden Treibhausgasemissionen und dem Abbau von Treibhausgasen aus der Atmosphäre (NettoTreibhausgasneutralität) erreicht werden.

§ 4 Jahresemissionsmengen

(1) Zur Erreichung der Ziele nach § 3 Absatz 1 werden für die nachfolgenden Sektoren absinkende Emissionsmengen festgelegt:

Jahresemissionsmenge in Mio. Tonnen CO ₂ - Äquivalent	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Energiewirtschaft		257								175
Industrie	182	177	172	168	163	158	154	149	145	140
Gebäude	113	108	103	99	94	89	84	80	75	70
Verkehr	145	139	134	128	123	117	112	106	101	95
Landwirtschaft	68	67	66	65	64	63	61	60	59	58
Abfallwirtschaft und Sonstiges	9	8	8	7	7	7	6	6	5	5

Emissionen 2050: Gebäude: Null-Emissionen



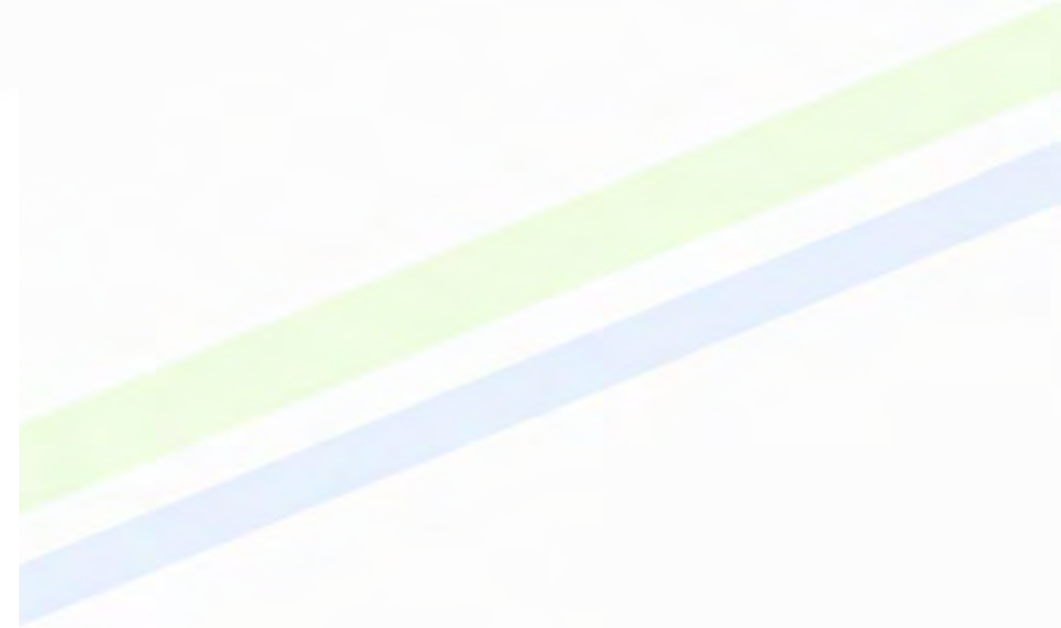
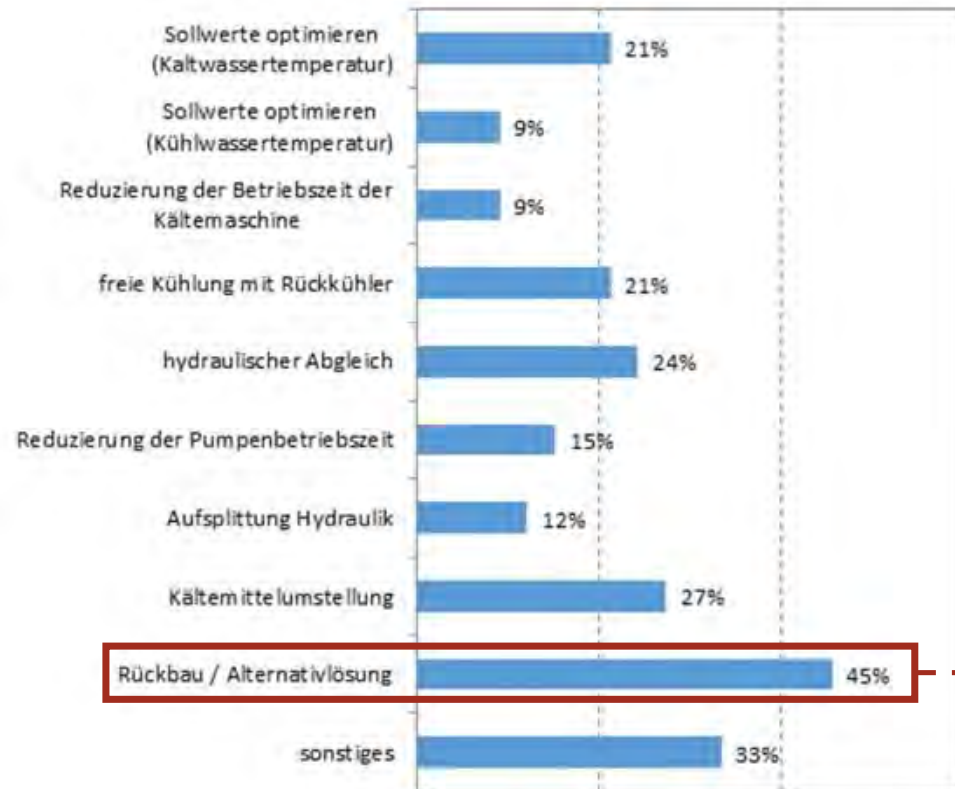
Senkung der Volllaststunden der Luftförderung

Effizienzsteigerung der Luftförderung

Anpassung an gesetzliche Vorgaben

Statistische Verteilung der Sanierungsempfehlungen nach Kategorien (RLT) – ungewichtete Häufigkeit in Abhängigkeit des Baualters

Quelle: Chancen der Energetische Inspektion für Gesetzgeber, Anlagenbetreiber und die Branche, H. Schiller, R. Mai, C. Händel, Fraunhofer IRB Verlag, 2014



Erneuerung unter Beachtung der F-Gase-Verordnung

Statistische Verteilung der Sanierungsempfehlungen nach Kategorien (Kälte) – ungewichtete Häufigkeit in Abhängigkeit des Baualters

Quelle: Chancen der Energetische Inspektion für Gesetzgeber, Anlagenbetreiber und die Branche, H. Schiller, R. Mai, C. Händel, Fraunhofer IRB Verlag, 2014

Vorgehensweise

- Welcher mittlerer Volumenstrom eines RLT-Gerätes ergibt sich aus den Marktdaten?
- Definition eines Mustergebäudes mit spezifischer Anlagentechnik
- Ermittlung der Energiebedarfswerte in Anlehnung an DIN V 18599 bzw. aus Anlagensimulation
- Bestimmung des anlagenspezifischen CO₂-Einsparpotenzials
- Abschätzung der Investitionskosten
- Berechnung der CO₂-Vermeidungskosten
- Hochrechnung auf den Bestand

Definition:

Bei der Berechnung von CO₂-Vermeidungskosten berücksichtigt man einerseits alle Mittel, die zunächst aufgebracht werden müssen, und andererseits auch durch die Maßnahme vermiedene Kosten – nicht aber Einsparungen durch vermiedene Klimaschäden oder andere indirekte, schwer quantifizierbare Faktoren.

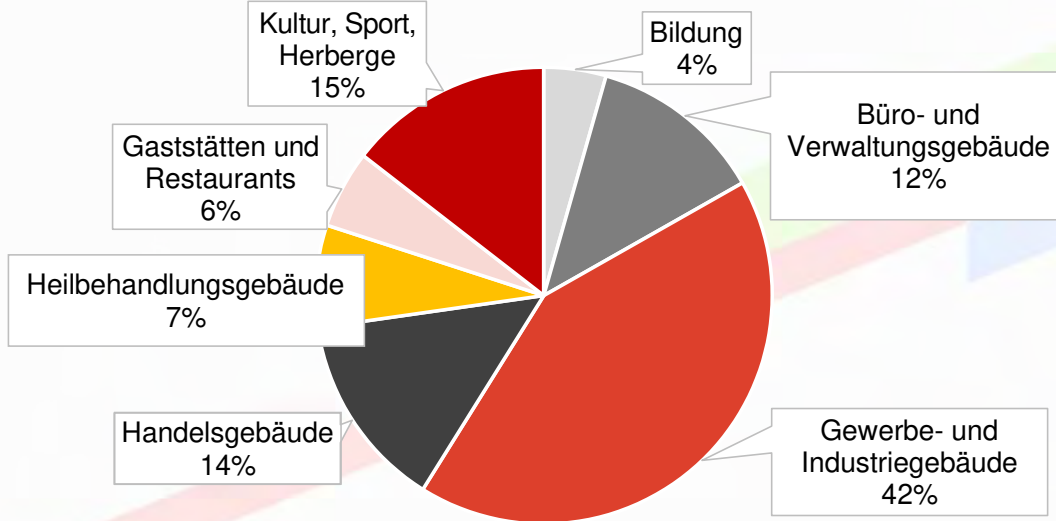


1. Distanzbasierter Verteilungsalgorithmus

2. NWG-Gebäudeverteilung

3. RLT-Ausstattungs-wahrscheinlichkeiten

Verteilung RLT-Anlagen



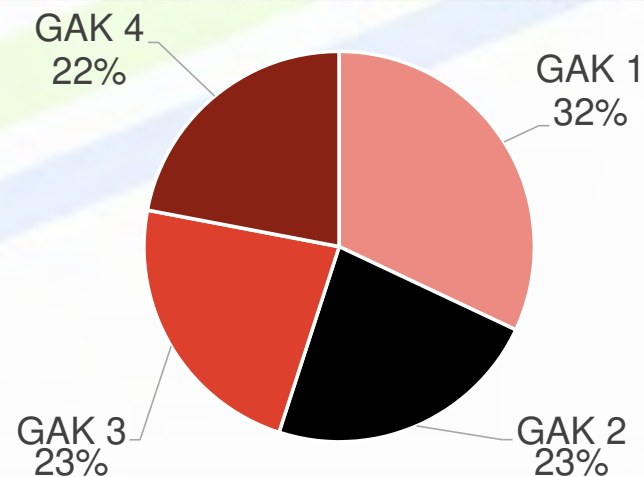
Anzahl RLT-Anlagen

Bildungsgebäude	41.274
Büro- und Verwaltungsgebäude	115.867
Gewerbe- und Industriegebäude	393.930
Handelsgebäude	129.719
Heilbehandlungsgebäude	68.042
Gaststätten und Restaurants	51.289
Kultur, Sport, Herberge	135.802
Gesamt:	935.922

■ Berücksichtigung des Gerätealters

Hochrechnung – Anzahl RLT-Anlagen	
Bildungsgebäude	41.274
Büro- und Verwaltungsgebäude	115.867
Gewerbe- und Industriegebäude	393.930
Handelsgebäude	129.719
Heilbehandlungsgebäude	68.042
Gaststätten und Restaurants	51.289
Kultur, Sport, Herberge	135.802
Gesamt:	935.922

Gerätealtersklasse ermittelt aus Verkaufsdaten RLT-Herstellerverband				
Klasse	GAK 1	GAK 2	GAK 3	GAK 4
Jahre	bis 2001	2002 bis 2007	2008 bis 2013	ab 2014



■ Gerätealtersklasse

- ≡ Unterschiedliche Ventilatorwirkungsgrade
- ≡ Unterschiedliche Verteilung der KVS- und VVS-betriebenen Anlagen in Deutschland

Marktdaten RLT-Geräte

Der Anteil des Herstellerverbandes Raumluftechnische Geräte e. V. 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).



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

- 2017 wurden in Deutschland 20.375 Lüftungsgeräte ausgeliefert, unabhängig vom speziellen Einsatzbereich.
- Unter Berücksichtigung des aktuellen Marktanteils von 70 % ergeben sich damit für das Betrachtungsjahr 2017 insgesamt 29.107 gelieferte Einheiten.
- Davon wurden 23.431 RLT-Geräte mit WRG-Systemen ausgestattet.
- Der mittlere Volumenstrom liegt bei 14.000 m³/h

- Die Austauschquote beträgt etwa 6 %

Marktdaten RLT-Geräte

Hochrechnung – Anzahl RLT-Anlagen	
Büro- und Verwaltungsgebäude	115.867



Von den etwa 37.000 RLT-Geräten (GAK 1, älter als 18 Jahre) werden nur etwa 1.380 RLT-Geräte des vorhandenen Bestandes ausgetauscht.

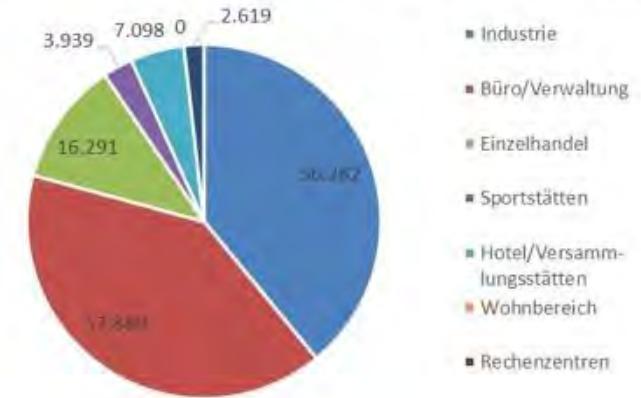
Es vergehen etwa 26 Jahre, bis der komplette Bestand ausgetauscht wurde

Ziel: Erhöhung der Austauschquote

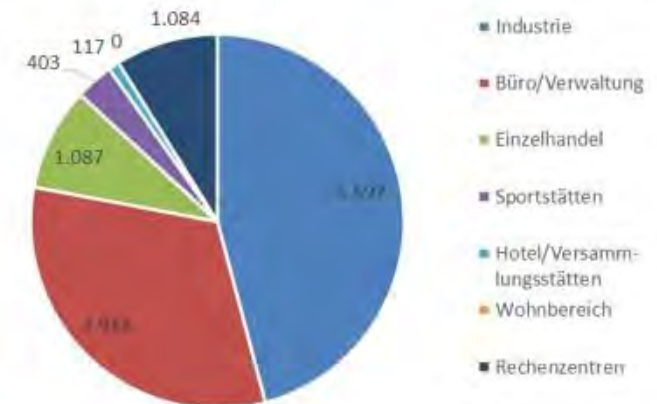
- Annahme: gesamte RLT-Kühlung durch Kaltwassersätze
- ca. 132.000 Stk. Kaltwassersätze im Jahr 2002 in Betrieb [1]
- prognostizierter Anstieg bis 2030 um ca. 25% auf ca. 165.000 Stk. [2]
- Annahme 2018: ca. 144.000 Stk. Klimakältemaschinen als Kaltwassersatz im Bestand vorhanden
- Größter Anteil im Büro- und Industriebereich (zahlenmäßig)
- im Industriebereich größter Endenergiebedarf

Beschränkung auf Kaltwassersätze im Büro- und Verwaltungsgebäude-Bereich (58.000 Stk.)

Anzahl installierter Kaltwassersätze 2018 in D [Stk.]



Endenergiebedarf Kaltwassersätze 2018 in D [GWh/a]



[1] Statusbericht des DKV Nr. 22: Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte in der Bundesrepublik Deutschland, 2002

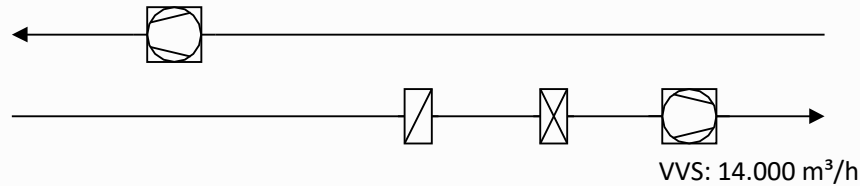
[2] Schädlich, S.: "Kältetechnologien in Deutschland,, Vortrag BMU Berlin, 2013

ökologische und ökonomische Randbedingungen unter Beachtung der mittleren RLT-Gerätegröße und den Daten der DIN V 18599

Berechnungsrandbedingungen	Stand 2018	
Energiekosten Strom	16,4	ct/kWh
CO2-Emissionsfaktor Strom	518	g_CO ₂ /kWh
Energiekosten Wärme	6,2	ct/kWh
CO2-Emissionsfaktor Wärme (Mix)	303	g_CO ₂ /kWh
Nominalzins (Ø 2009-2017)	2,2	%
Inflation (Ø 2009-2017)	1,4	%
--> Realzins (Ø 2009-2017)	0,8	%
Nutzungsdauer	15	a
Barwertfaktor	14,08	-
Annuitätsfaktor	0,071	-

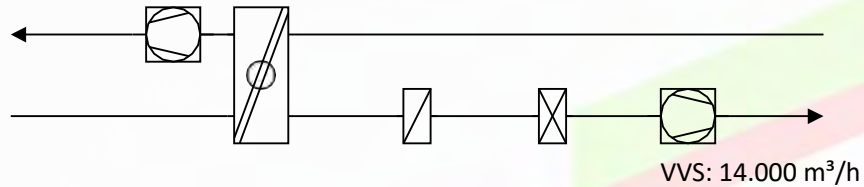
Gebäudeeigenschaften	Variante 1	Variante 2
Nutzfläche	1.500 m ²	3x 1.500 m ²
Gebäudeart	Büro- und Verwaltungsgebäude	
Nutzungsart	Großraumbüro	
Nutzungszeit täglich	12 h/d	
Nutzungszeit wöchentlich	250 d/a	
Nutzungsstunden jährlich	3000 h/a	
hyg. Mindestaußenluftvolumenstrom spez.	6 m ³ /h je m ²	
Kühllast abs.	37,5 kW	112,5 kW
Feuchteanforderung Raum	mit Toleranz (6 < x < 10 g/kg)	

Vorgehen WRG



Stand 2017

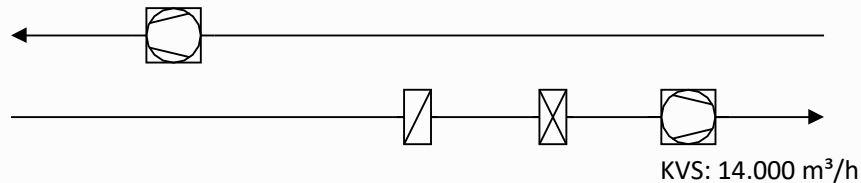
Ventilatorwirkungsgrad: 60 %
Druckabfall WRG: 2 x 169,5 Pa
Übertragungsgrad: 73,2 %



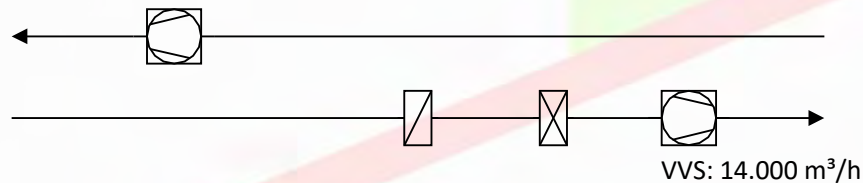
Welche CO₂-Einsparungen werden mit den im Jahr 2017 verkauften RLT-Geräten durch Einsatz der WRG erreicht?

Vorgehensweise Variable Volumenstromregelung und Erhöhung des Ventilatorwirkungsgrades

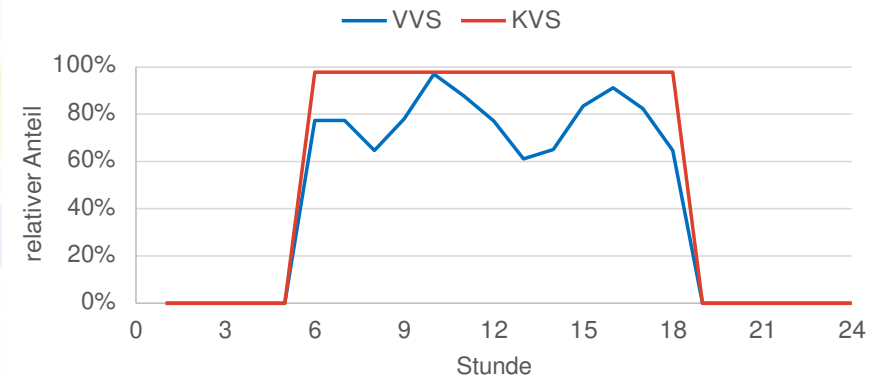
Ventilatorwirkungsgrad: 40 %



Ventilatorwirkungsgrad: bis 62 %



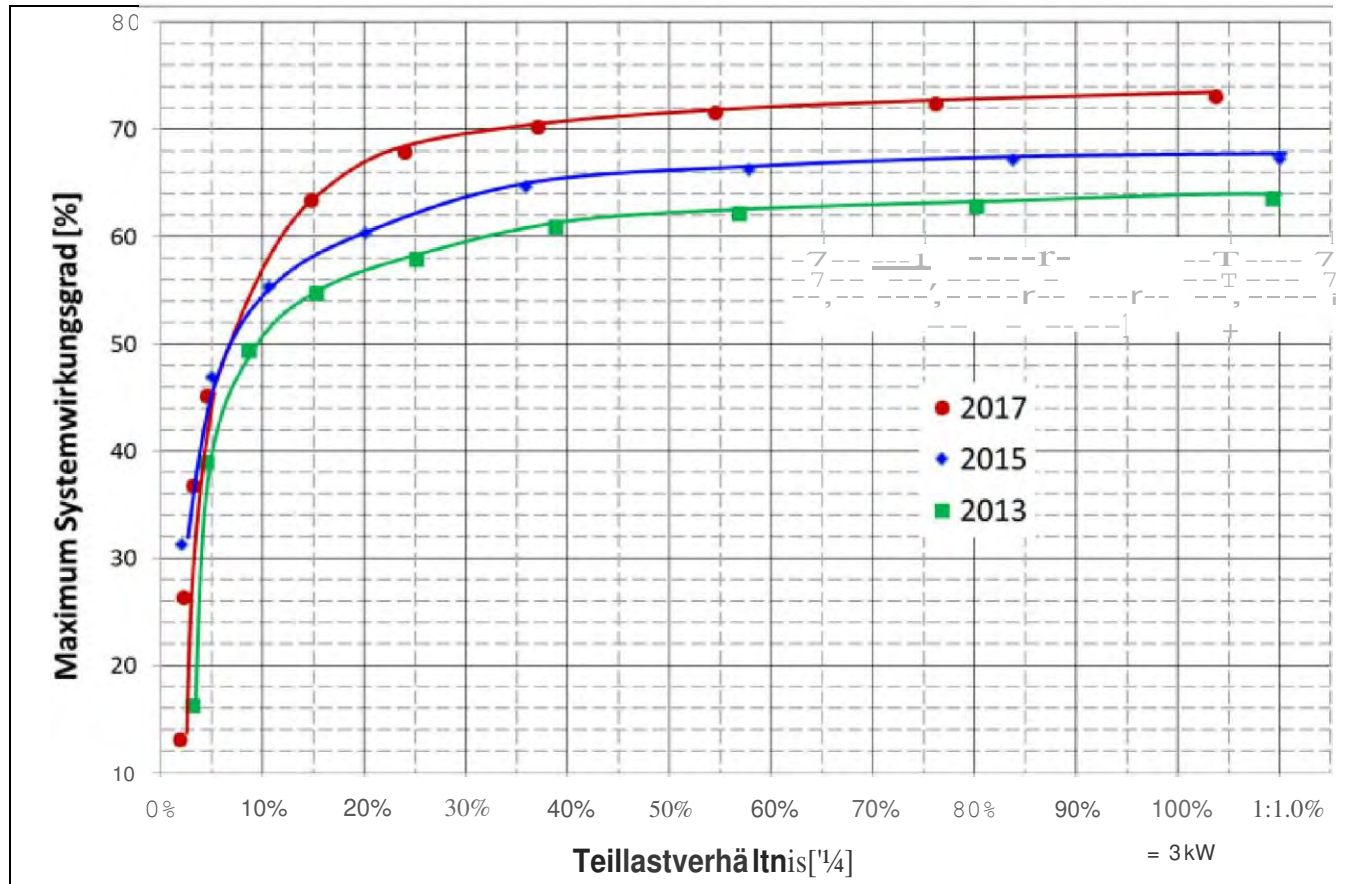
Angenommenes Lüftungsprofil am Wochentag



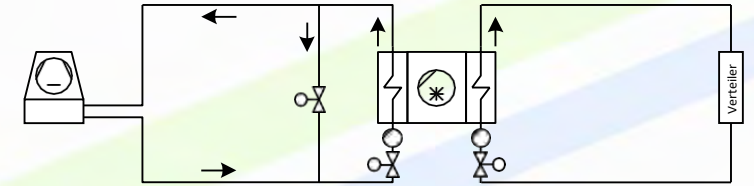
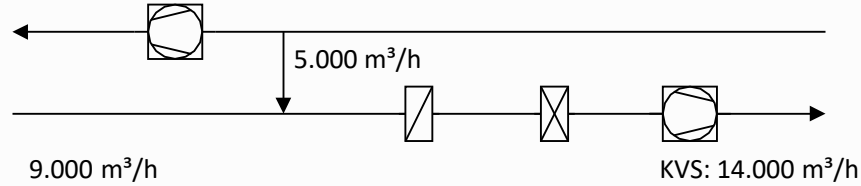
Welche CO₂-Einsparungen werden bei einer Ertüchtigung aller Büro- und Verwaltungsgebäude mit RLT-Anlage erreicht?

Die Hochrechnung basiert auf den in den letzten 26 Jahren verkauften Geräten und deren durchschnittlichen Volumenströmen. Durch die Nutzung der Gerätealtersklassen (GAK) wurden abhängig vom Gerätealter die Systemwirkungsgrade und der Anteil von KVS/VVS-Systemen der Geräte variiert.

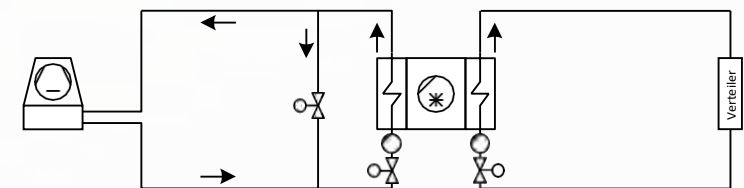
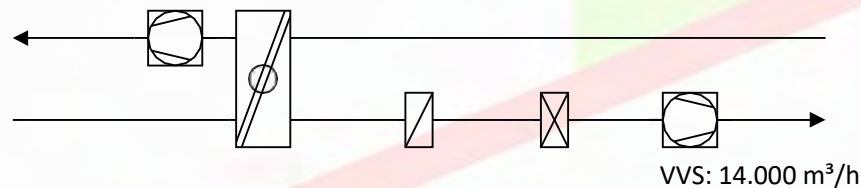
Ventilatorwirkungsgrade auf dem Prüfstand



Vorgehensweise Klimakälte



Basisvariante (Baujahr 2005)
 Kältemittel: R407c
 taktende Betriebsweise
 6/12 °C Kaltwasser



Variante 1:
 Kältemittel: Propan
 mehrstufiger Verdichter
 8/14 °C

Variante 2:
 Kältemittel: R1234ze
 Turboverdichter
 8/14 °C

Welche CO₂-Einsparungen werden entsprechend dem angenommenen Anlagenmix erreicht, wenn der Bestand an Kaltwassersätzen ausgetauscht wird und die Systembedingungen verbessert werden?

Beispielberechnung – CO₂-Bilanz: Besonderheit Klimakälte

Stand 2018		Basisvariante (Baujahr 2005)	Variante 1 (kleine Anlage)	Variante 2 (große Anlage)
CO₂-Bilanz	Kältemittel	R407C	R290 (Propan)	R1234ze
	GWP₁₀₀	1774	3	1
	Kältemittelfüllmenge [kg]	21	8	135
	Nutzungsdauer [a]	15	15	15
	jährliche Leckrate [UBA 2013]	4%	3%	3%
	Entsorgungsverlust [UBA 2013]	30%	30%	30%
	direkter Anteil Leckage [kg CO ₂]	22.352	11	61
	direkter Anteil Entsorgung [kg CO ₂]	26.078	17	95
	direkter Anteil Leckage + Entsorgung [kg CO ₂]	48.430	28	155
		100%	0,06%	0,32%
	indirekter Anteil Energie [kg CO ₂]	125.815	81.702	153.532
		100%	65%	
	TEWI [kg CO₂/a]	11.616	5.449	10.246
	%	100%	47%	29%
	Differenz [kg CO ₂ /a]	0	-6.168	-24.603
	SEER	2,65	3,88	6,14

[1] Umweltbundesamt, Reihe Climate Change 25/2014, Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie

Schlussfolgerung WRG für die im Jahr 2017 verkauften RLT-Geräte

Über die Nutzungsdauer von 15 Jahren ergibt sich für die jährlich installierten WRG-Systeme eine Brutto-CO₂-Einsparung von 12.659.653 t CO₂.

Damit errechnet sich eine Netto-CO₂-Einsparung von 755.794 t CO₂ pro Jahr.

Unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergeben sich damit CO₂-Vermeidungskosten in Höhe von **-216 € / t CO₂**.

Hinweis:

Die CO₂-Vermeidungskosten liegen bei Vollast, je nach Bilanzgrenze bei 216 bis 253 €/t.

Im Teillastfall (0,8) bei 209 bis 254 €/t.

Schlussfolgerung WRG für den Fall, dass alle RLT-Geräte des BuV-Bestandes (37.000 in der GAK 1, älter als 18 Jahre) zusätzlich ertüchtigt werden.

Unter der Maßgabe, dass alle RLT-Geräte (GAK 1) in Büro- und Verwaltungsgebäuden zusätzlich mit WRG ausgestattet werden, errechnet sich eine Netto-CO₂-Einsparung von 1.904.758 t CO₂ pro Jahr.

Die CO₂-Vermeidungskosten in Höhe von **-216 € / t CO₂** bleiben konstant.

Schlussfolgerungen Variable Volumenstromregelung und Erhöhung des Ventilatorwirkungsgrades

Bei einer Ertüchtigung aller Bestands-RLT-Anlagen in Büro- und Verwaltungsgebäuden errechnet sich eine jährliche Netto-CO₂-Einsparung von 399.686 t CO₂ pro Jahr.

Unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergeben sich damit CO₂-Vermeidungskosten in Höhe von **-203 € / t CO₂**.

Schlussfolgerung Klimakälte

Bei einem Ersatz aller Kaltwassersätze in den Büro- und Verwaltungsgebäuden mit RLT-Anlage errechnet sich eine jährliche Netto-CO₂-Einsparung von 690.142 t CO₂ pro Jahr.

Unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergeben sich damit CO₂-Vermeidungskosten in Höhe von **+107 € / t CO₂**.

14. Juni 2017, 15:19 Uhr Umwelttechnik

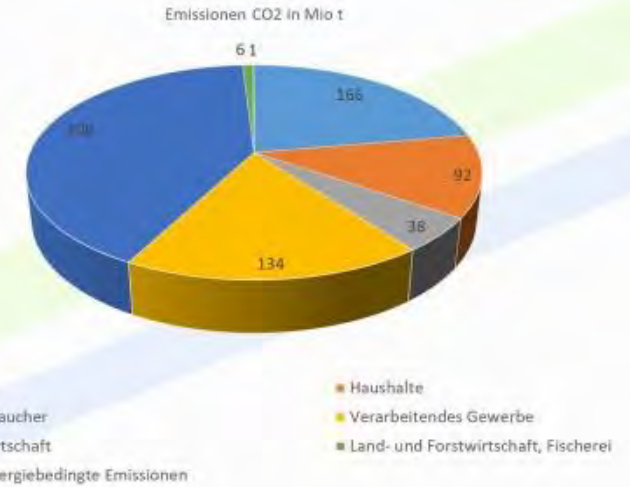
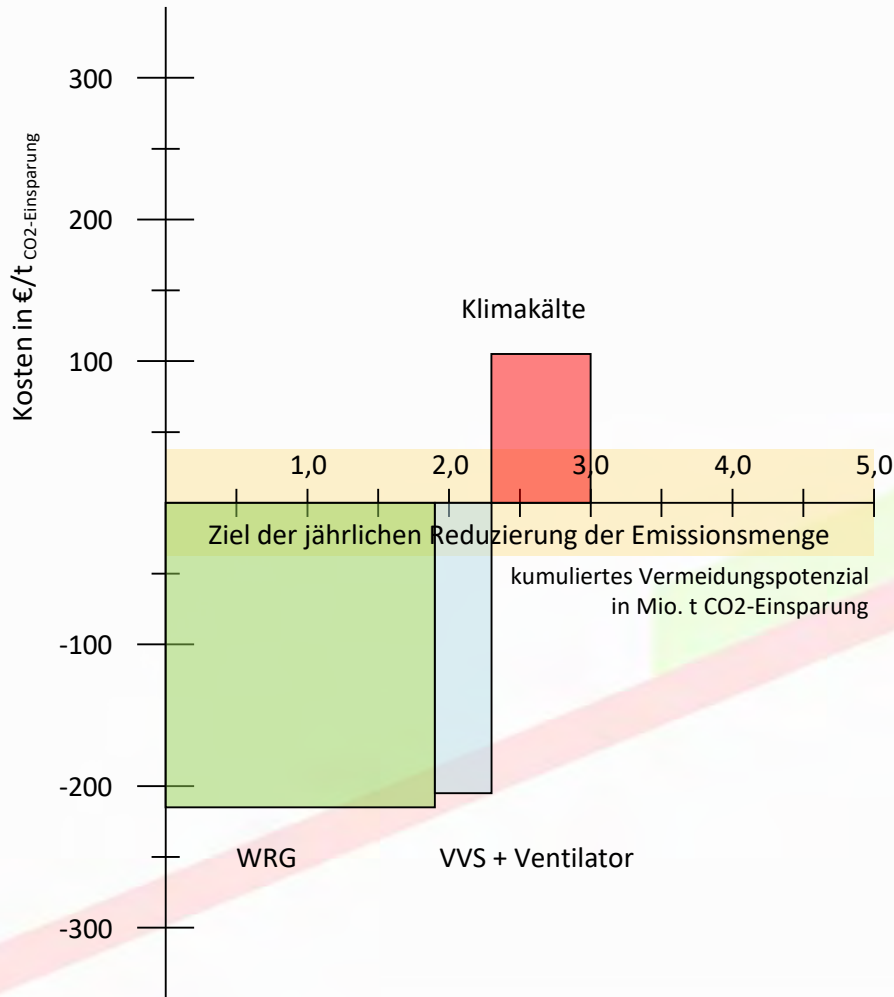
Schweizer Anlage filtert CO₂ aus der Atmosphäre



Luftreinigungs-Fabrik vor Bergpanorama: die Anlage von Climeworks in Hinwil bei Zürich. (Foto: picture alliance/KEYSTONE)

Ein Schweizer Start-up recycelt mit einem riesigen Filter Kohlendioxid aus der Luft. Die Technik soll helfen, den Klimawandel zu bremsen. Funktioniert das?

Momentan liegt der Preis für **eine Tonne** des gefilterten Kohlenstoffdioxids zwar noch bei 600 Franken (ca. **530 Euro**), aber bis 2030 soll der Preis auf 100 Franken (rund 88 Euro) gesenkt werden können.



Die dargestellte Reduzierung der Emissionsmenge kann mit den betrachteten 3 Maßnahmen nur einmal erreicht werden

Aber:
Die Büro- und Verwaltungsgebäude stellen nur etwa 12 % aller RLT-Anlagen im Gebäudebereich

FAZIT

Die vorgestellten CO₂-Einsparungen können nur erreicht werden, wenn es Lüftungsanlagen gibt.

Der Einsatz der Fensterlüftung ermöglicht diese Einspareffekte nicht

RLT-Anlagen sind kein Luxus, sondern ein aktiver Beitrag zum Umweltschutz

1 Person „liefert“ etwa:	20	l/h _{CO2}
Dichte CO ₂	1,96	g/l
Masse CO ₂ pro Person	39,2	g/h
Masse pro 20 Minuten	13,1	g/(20 Minuten)
bei 100 Zuhörern	1,3	kg/(20 Minuten)

**Gutachten zur Bezifferung der CO₂-Intensität von
Wärmerückgewinnungssystemen (WRG-Systemen)
Raumluftechnischer Geräte (RLT-Geräte)
für Nicht-Wohngebäude**



GUTACHTEN

Bezifferung der CO₂-Intensität von Wärmerückgewinnungssystemen (WRG-Systemen) Raumlufttechnischer 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 CO₂-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 CO₂-Einsparung und zur CO₂-Intensität von Wärmerückgewinnungssystemen Raumluftechnischer Geräte, welche in Nicht-Wohngebäuden (NWG) in Deutschland eingesetzt werden. Als CO₂-Intensität wird das spezifische Verhältnis der netto CO₂-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 %) abgeschätzt¹. 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 2013² 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 2014³ 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 Kassel⁴).

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 Einheiten⁵, 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-

¹ Lot 6 Study, Draft Working Document Ventilation Units 10.10.2012

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

³ 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

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

⁵ 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 können⁶.

Der mittlere Volumenstrom der Anlagen lag 2017 bei rund 14.000 m³/h. Der mittlere Differenzdruck der Anlagen lag bei 169,5 Pa sowohl für die Zuluft- als auch für die Abluftseite⁷.

Damit ergibt sich ein Gesamtvolumenstrom von 328.034.000 m³/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/(m³/h)/a⁸ bei 3.250 h/a^{9 10} Betriebsdauer berücksichtigt wird, ergibt sich eine Wärmearbeit von 3.805 GWh/a (328.034.000 m³/h multipliziert mit 11,6 kWh/(m³/h)/a). Der durchschnittliche Übertragungsgrad der WRG-Systeme lag im Jahr 2017 in Deutschland bei 0,732¹¹. Damit ergibt sich eine zurückgewonnene Wärmearbeit von 2.785 GWh/a für die in 2017 installierten Anlagen.

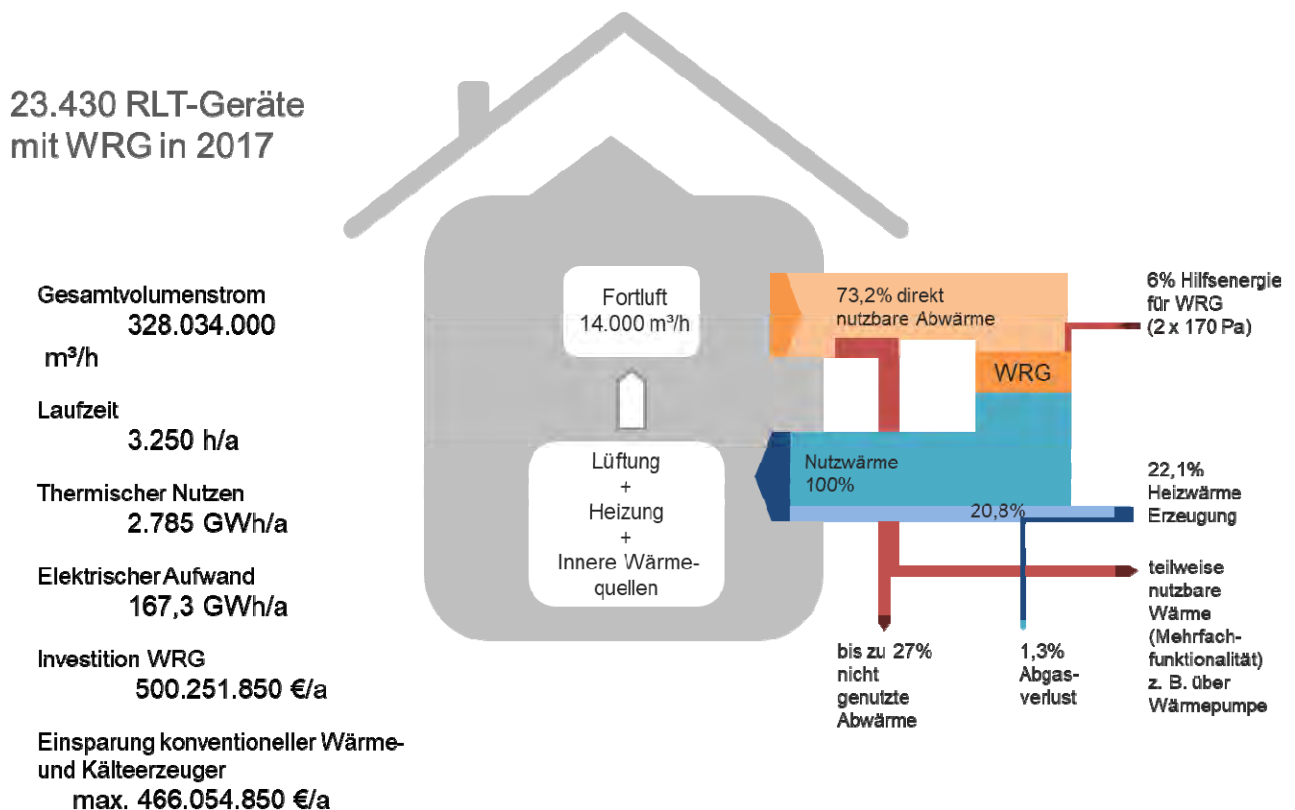


Abbildung 1: Nutzung und Aufwand der Wärmerückgewinnung in NWG in Deutschland

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

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

⁸ Bezogen auf 8,4 kWh/(m³/h)/a bei 2.350 h/a Beck, E., Energieverbrauch, -einsparpotential und- grenzwerte von Lüftungsanlagen, Dissertation, Universität Kassel, 2000

⁹ 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)

¹⁰ 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

¹¹ 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 5¹² 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 CO₂-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 m³/s multipliziert mit 2 mal 169,5 Pa bei einem angenommenen Systemwirkungsgrad der elektrischen Antriebe von 0,6¹³). 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 bei¹⁴. 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 %) ¹⁵. Zusätzlich müssen Verteil- und

¹² 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

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

¹⁴ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/6_datentabelle-zur-abb_energieverbrauch-sektor-hgd-waermezwecke_2018-02-14.pdf

¹⁵ 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 13¹⁶ (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)¹⁷ bewertet.

Zur Berechnung der CO₂-Emissionsfaktoren¹⁸ wird Gas mit 0,202 kg eCO₂/kWh, Öl mit 0,315 kg eCO₂/kWh, erneuerbare Energieträger mit 0,030 kg eCO₂/kWh, Fernwärme mit 0,341 kg eCO₂/kWh, Strom mit 0,520 kg eCO₂/kWh (Strommix Inlandsverbrauch) und Kohle mit 0,429 kg eCO₂/kWh berücksichtigt. Hiermit ergibt sich für den Wärmemix ein Emissionsfaktor von 0,225 kg eCO₂/kWh. Unter Berücksichtigung der Verteilverluste von 35 % liegt entsprechend die Emission bezogen auf Nutzwärme bei 0,303 kg eCO₂/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).

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

¹⁷ https://www.bdew.de/media/documents/190723_BDEW-Strompreisanalyse_Juli-2019.pdf, Seite 24

¹⁸ <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 ermittelt¹⁹. 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 2017²⁰) auf das Niveau 2017 (1,014⁸) 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 Wärmeleistung²¹

Leistungsbereich	[KW]	50	100	150	200	250	300	500
Gas-Brennwert	€/KW	120	100	90	90	80	60	60
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
Gas-Brennwert korr.	€/KW	133	111	100	100	89	66	66
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.

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

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

²¹ 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 Kälteleistung²²

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
Korr. Mittelwerte	[€/KW]	199	155	122	116	100	94	83

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 Kälteleistung²³

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
Korr. Mittelwerte	[€/KW]	164	148	141	139

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 Kälteleistung²⁴

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
verwendete Summenwerte	[€/KW]	357	338	270	241	223

²² Ebenda

²³ Ebenda

²⁴ 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 2017²⁵) 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 CO₂-Einsparung der in 2017 ausgelieferten Anlagen, die voraussichtlich in 2018 in Betrieb genommen wurde, bei 843.976.897 kg eCO₂/a (2.785 GWh/a multipliziert mit 0,303 kg eCO₂/kWh). Demgegenüber steht ein CO₂-Aufwand durch Elektroenergie von 87.006.462 kg eCO₂/a (167.320.120 kWh/a multipliziert mit 0,52 kg eCO₂/kWh) und ein Aufwand zur Herstellung der WRG mit 1.148.900 kg eCO₂/a (34.467.000 € multipliziert mit 0,5 kg eCO₂/€^{26,27} bezogen auf 15 Nutzungsjahre), sowie ein Aufwand für die Instandhaltung von 14.111 kg eCO₂/a (64.142 € multipliziert mit 0,22 kg eCO₂/€).

²⁵ 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):

²⁶ 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

²⁷ 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 CO₂-Einsparung von 12.659.653 to. eCO₂. Dem steht ein CO₂-Aufwand von 1.305.097 to. eCO₂ für die elektrische Energie zum Betrieb der WRG-Systeme und 17.234 to. eCO₂ für die Herstellung der Systeme, sowie 405 to. eCO₂ für die Wartung und Instandhaltung der Systeme gegenüber. Damit errechnet sich eine Netto-CO₂-Einsparung von 11.336.918 to. eCO₂.

In Bezug auf die Gesamtinvestition der WRG-Systeme (ohne Berücksichtigung der Betriebskosten und Einsparungen) ergibt sich somit eine CO₂-Intensität von 328,9 kg eCO₂/€ (11.336.918 to. eCO₂ 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 CO₂-Intensität von -3,94 kg eCO₂/€ (11.336.918 to. eCO₂ bezogen auf eine Investition (Gesamteinsparung) von netto -2.874.683.340 €).

7. CO₂-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 CO₂-Intensität von 78,88 kg eCO₂/€. 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 CO₂-Intensität von -4,08 kg eCO₂/€ (11.281.365 to. eCO₂ bezogen auf eine Investition (Gesamteinsparung) von netto -2.763.281.056 €).

8. CO₂-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 CO₂-Intensität von 42,09 kg eCO₂/€. 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 CO₂-Intensität von -4,25 kg eCO₂/€ (11.218.161 to. eCO₂ bezogen auf eine Investition (Gesamteinsparung) von netto -2.636.537.815 €).

9. CO₂-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 CO₂-Intensität von 22,19 kg eCO₂/€. 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 CO₂-Intensität von -4,63 kg eCO₂/€ (11.098.553 to. eCO₂ bezogen auf eine Investition (Gesamteinsparung) von netto -2.396.685.067 €).

10. Zusammenfassung

Die CO₂-Intensität der WRG in Nicht-Wohngebäuden liegt bei reinem Bezug auf die Investitionskosten ohne Berücksichtigung der Energieeinsparungen bei rund **22,2 kg eCO₂/€**, wenn WRG-Systeme ohne Auswirkung auf die Wärme- und Kälteerzeugung betrachtet werden.

Wird lediglich die Minderung der Wärmeerzeugung berücksichtigt, liegt die CO₂-Intensität der WRG bei rund **42,1 kg eCO₂/€**.

Mit einer erweiterten Bilanzgrenze über das gesamte Gebäude liegt die CO₂-Intensität der WRG bei **328,9 kg eCO₂/€** und damit deutlich über vergleichbaren Technologien wie der Renovierung der Gebäudehülle oder der Beleuchtung²⁸.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse bei Volllast

	CO ₂ -Intensität	CO ₂ -Vermeidungskosten	Wirtschaftlicher Hebel Investition zur Einsparung
Nur WRG (Investition <u>ohne</u> Betriebskosteneinsparung) Mit Berücksichtigung	22,2 kg eCO ₂ /€	45,05 € / to. eCO ₂	4,19 €/€
- Minderinvestition Wärmeerzeugung	42,1 kg eCO ₂ /€	23,76 € / to. eCO ₂	8,76 €/€
- Minderinvestition Wärm- und Kälteerzeugung	78,9 kg eCO ₂ /€	12,68 € / to. eCO ₂	17,21 €/€
- Minderinvestition Wärm- und Kälteerzeugung einschl. RKW	328,9 kg eCO ₂ /€	3,04 € / to. eCO ₂	74,64 €/€
Nur WRG (Investition <u>mit</u> Betriebskosteneinsparung) Mit Berücksichtigung	-4,63 kg eCO ₂ /€	-216,0 € / to. eCO₂	
- Minderinvestition Wärmeerzeugung	-4,25 kg eCO ₂ /€	-235,0 € / to. eCO₂	
- Minderinvestition Wärm- und Kälteerzeugung	-4,08 kg eCO ₂ /€	-244,9 € / to. eCO₂	
- Minderinvestition Wärm- und Kälteerzeugung einschl. RKW	-3,94 kg eCO ₂ /€	-253,6 € / to. eCO₂	

Der reziproke Wert der CO₂-Intensität ergibt die s. g. CO₂-Vermeidungskosten. Diese liegen für Systeme der Wärmerückgewinnung je nach Wahl der Bilanzgrenze bei 3,04 € pro to. eCO₂ mit Berücksichtigung des Gebäudes (Verringerung der Wärme- und Kälteerzeugung) bis zu 45,05 € pro to. eCO₂, wenn die WRG für sich alleine betrachtet wird. Wird lediglich die Minderung der Wärmeerzeugung betrachtet, liegen die CO₂-Vermeidungskosten bei 23,75 € pro to. eCO₂.

Werden neben den Investitionskosten auch die Betriebskosteneinsparungen mit berücksichtigt liegt die CO₂-Intensität bei rund **-4,6 kg eCO₂/€**, wenn WRG-Systeme ohne Auswirkung auf die Wärme- und Kälteerzeugung betrachtet werden.

Wird lediglich die Minderung der Wärmeerzeugung berücksichtigt, liegt die CO₂-Intensität der WRG bei rund **-4,3 kg eCO₂/€**. Mit einer erweiterten Bilanzgrenze über das Gebäude liegt die CO₂-Intensität der WRG bei **-3,9 kg eCO₂/€**.

Mit Berücksichtigung der Energieeinsparung sind die CO₂-Vermeidungskosten für Systeme der Wärmerückgewinnung negativ und liegen je nach Wahl der Bilanzgrenze bei **-254 € pro to. eCO₂** mit Berücksichtigung des Gebäudes (Verringerung der Wärme- und Kälteerzeugung) bis zu **-216 € pro**

²⁸ 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

to. eCO₂, wenn die WRG für sich alleine betrachtet wird. Wird lediglich die Minderung der Wärmeerzeugung berücksichtigt, liegen die CO₂-Vermeidungskosten bei **-235 € pro to. eCO₂**.

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 ₂ -Intensität	CO ₂ -Vermeidungskosten	Wirtschaftlicher Hebel Investition zur Einsparung
Nur WRG (Investition <u>ohne</u> Betriebskosteneinsparung)	18,27 kg eCO ₂ /€	54,73 € / to. eCO ₂	3,31 €/€
Mit Berücksichtigung			
- Minderinvestition Wärmeerzeugung	34,75 kg eCO ₂ /€	28,78 € / to. eCO ₂	7,12 €/€
- Minderinvestition Wärm- und Kälteerzeugung	65,19 kg eCO ₂ /€	15,34 € / to. eCO ₂	14,15 €/€
- Minderinvestition Wärm- und Kälteerzeugung einschl. RKW	272,10 kg eCO ₂ /€	3,67 € / to. eCO ₂	61,93 €/€
Nur WRG (Investition <u>mit</u> Betriebskosteneinsparung)	-4,79 kg eCO ₂ /€	-208,7 € / to. eCO₂	
Mit Berücksichtigung			
- Minderinvestition Wärmeerzeugung	-4,31 kg eCO ₂ /€	-232,9 € / to. eCO₂	
- Minderinvestition Wärm- und Kälteerzeugung	-4,10 kg eCO ₂ /€	-243,9 € / to. eCO₂	
- Minderinvestition Wärm- und Kälteerzeugung einschl. RKW	-3,93 kg eCO ₂ /€	-254,3 € / to. eCO₂	

Es wird deutlich, dass sich im Teillastfall (durchschnittlich 80 % der Nennluftmenge) die CO₂-Vermeidungskosten, insbesondere bei Betrachtung des Lebenszyklus fast nicht ändern, da zwar einerseits die Einsparung geringer wird, aber gleichzeitig auch die eingesparte CO₂-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 CO₂-Menge üblicherweise von 11,3 Mio. to. eCO₂ auf rund 22 Mio. to. eCO₂.

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 CO₂-Vermeidungskosten während des Lebenszyklus der WRG kann die grundsätzliche Empfehlung zum stärkeren Einsatz von RLT-Anlagen in NWG ausgesprochen werden. Damit wird nicht nur CO₂ 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

www.umwelt-campus.de

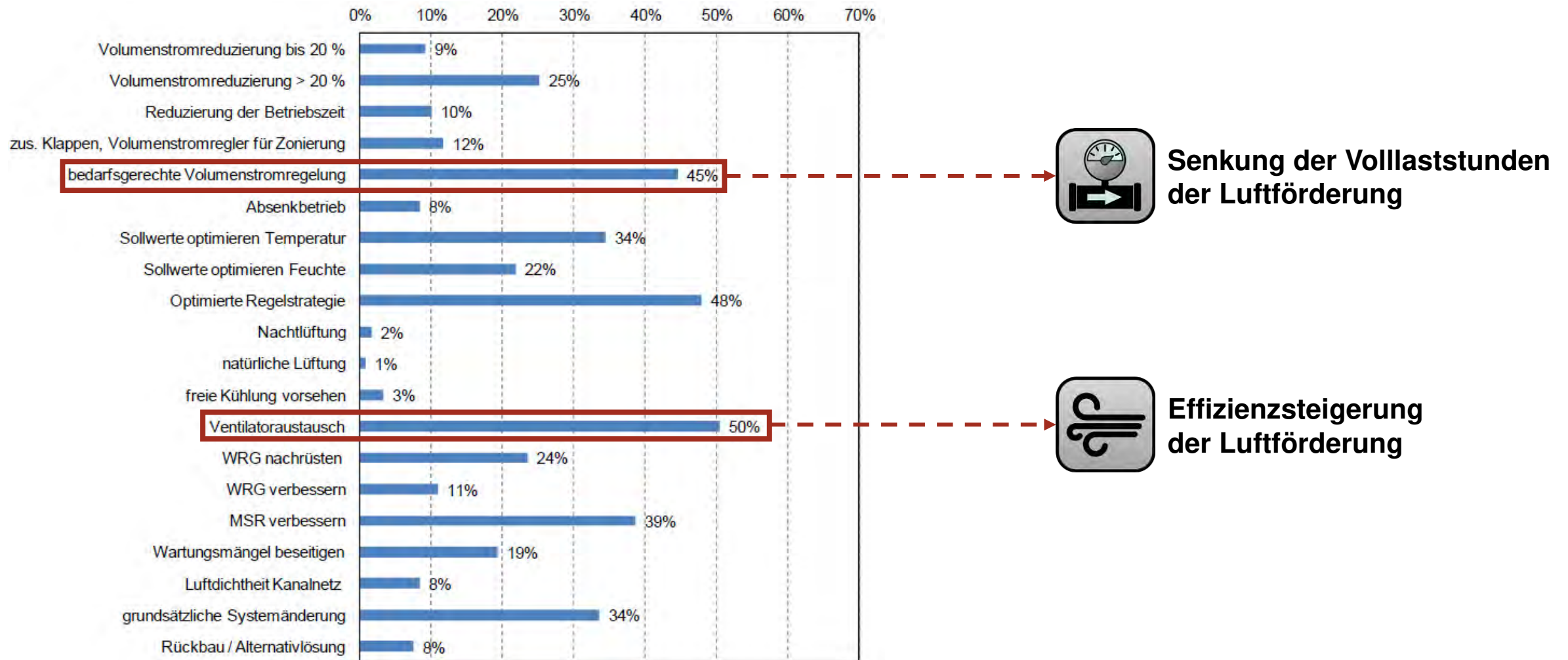
Gutachten zu CO₂-Vermeidungskosten in der Lüftungstechnik für Büro- und Verwaltungsgebäude in Deutschland



CO₂-Vermeidungskosten in der Lüftungstechnik für Büro- und Verwaltungsgebäude in Deutschland

Variable Volumenstromregelung und Erhöhung des Ventilatorwirkungsgrads

Motivation: Übersicht Emissionseinsparmaßnahmen im Bereich Luftförderung in Gebäuden

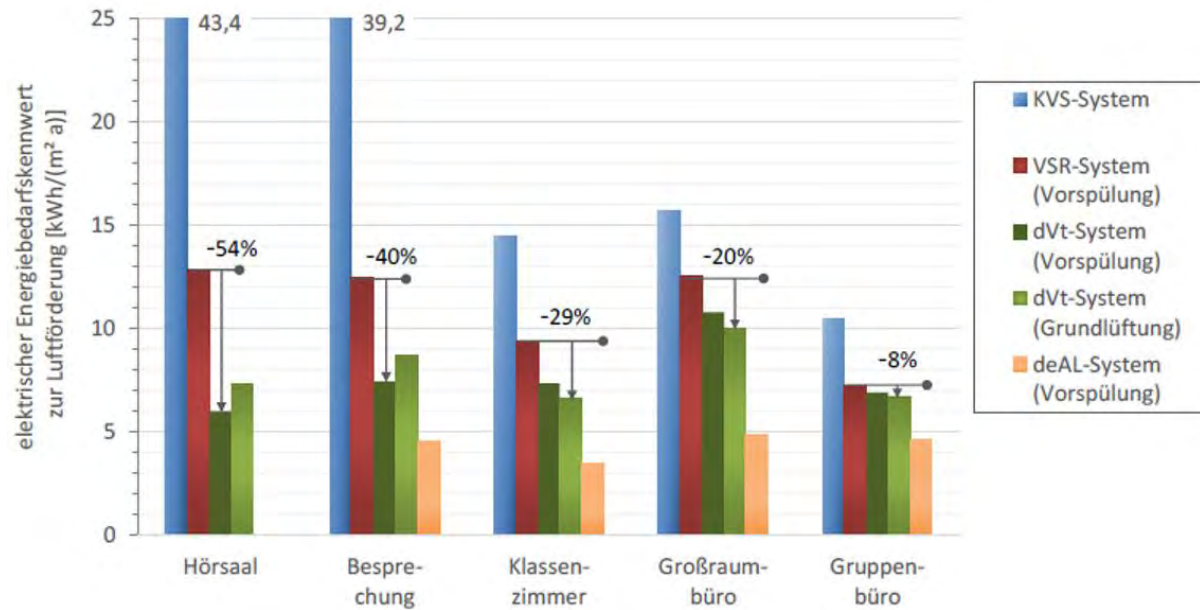


Statistische Verteilung der Sanierungsempfehlungen nach Kategorien (RLT) – ungewichtete Häufigkeit in Abhängigkeit des Baualters

Quelle: Chancen der Energetische Inspektion für Gesetzgeber, Anlagenbetreiber und die Branche, H. Schiller, R. Mai, C. Händel, Fraunhofer IRB Verlag, 2014

Motivation: Einsparpotentiale Luftförderung

Betriebsweise der Luftförderung



Elektrischer Energiebedarfskennwert zur Luftförderung im Vergleich

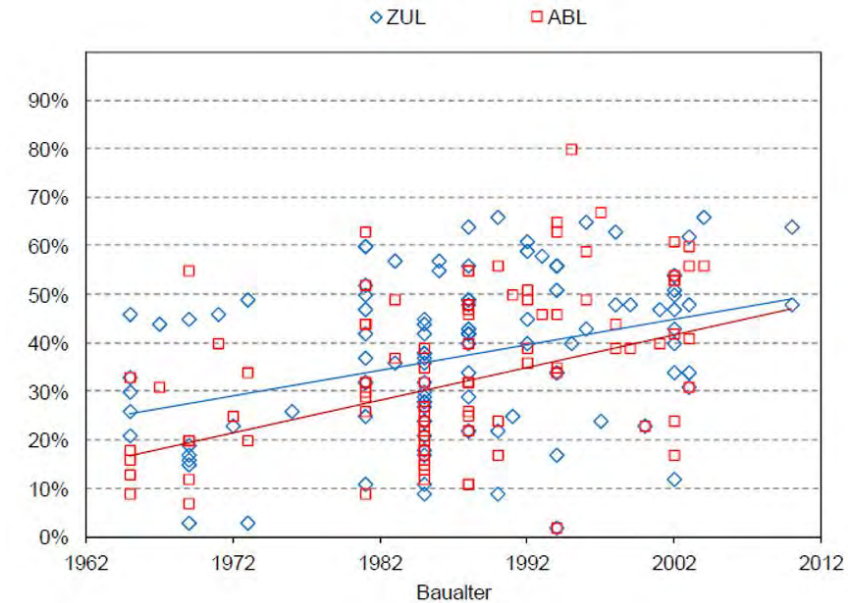
Quelle: Energetische und wirtschaftliche Bewertung von dezentralen Ventilatoren in zentralen Lüftungsanlagen, N. Alsen, Universität Kassel, 2017



Maßnahme 1

Konstanter Volumenstrom → Variabler Volumenstrom

Effizienz der Luftförderung



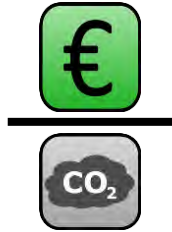
Ventilator-Systemwirkungsgrade in Abhängigkeit des Baualters

Quelle: Chancen der Energetische Inspektion für Gesetzgeber, Anlagenbetreiber und die Branche, H. Schiller, R. Mai, C. Händel, Fraunhofer IRB Verlag, 2014



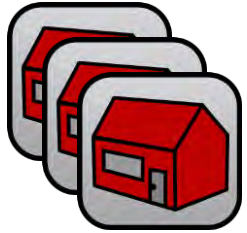
Maßnahme 2

Steigerung des Ventilatorwirkungsgrads



1. Ermittlung von CO₂-Vermeidungskosten der Maßnahmen im Büro- und Verwaltungsbereich

- a) Anlagensimulation
- b) Wirtschaftlichkeitsberechnung



2. Ableitung Gesamtanzahl RLT-Anlagen im dt. NWG-Bestand

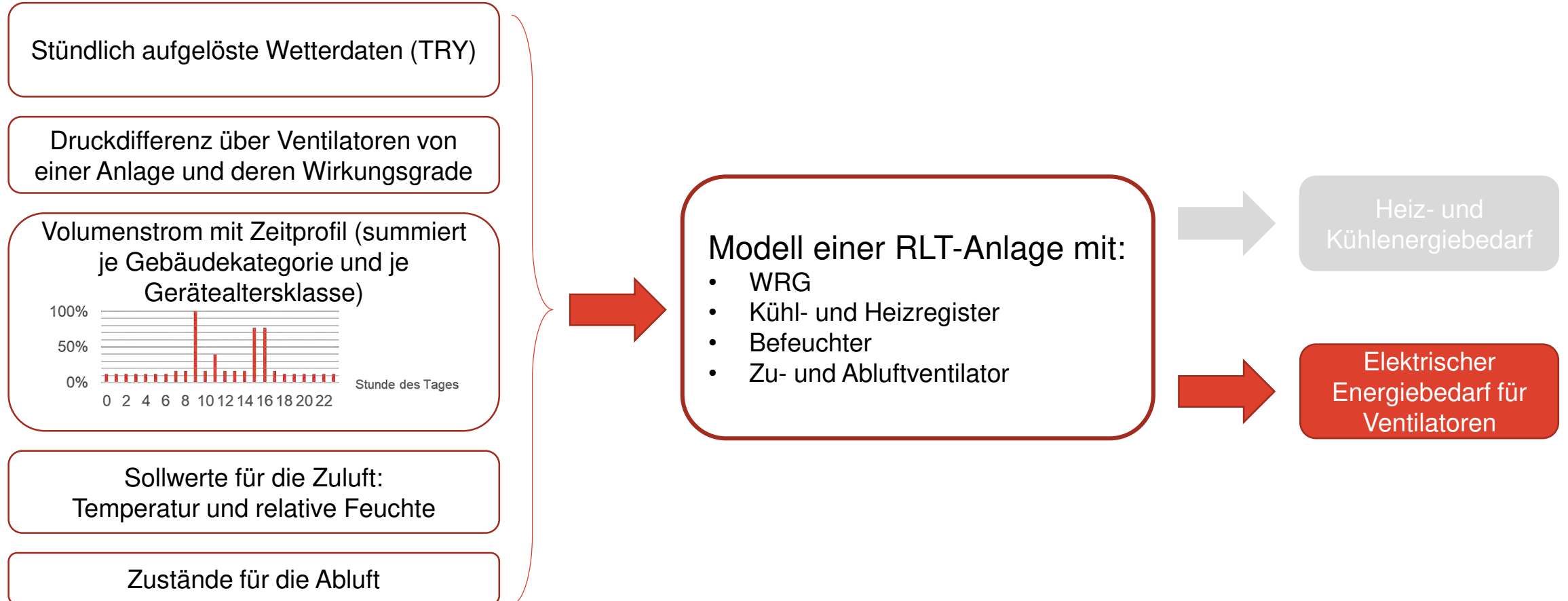
- a) Verkaufsdaten RLT-Herstellerverband 1993 – 2013
- b) Regressionsanalyse für 2014 – 2019
- c) Geräteanzahl in Betrieb aus den Jahren 1993 – 2019: ca. 936.000



3. Aufteilung der RLT-Anlagen auf NWG-Kategorien

- a) Definition von NWG-Kategorien
- b) Bestimmung von RLT-Ausstattungswahrscheinlichkeiten je NWG-Kategorie
- c) Zuteilung realer Geräte zu den NWG-Kategorien
- d) Detailbetrachtung der bestehenden Büro- und Verwaltungsgebäude

Simulationsframework



Anlagensimulation Bürogebäude

■ Eingangsparemeter in Berechnungen für ein Beispielgebäude mit 4.500 m² Nutzfläche

Variante	1: KVS	2: VVS	3: VVS + Ventilatortausch
Volumenstromregelung	KVS	VVS	VVS
Maximaler Volumenstrom [m ³ /h]	18.000	18.000	18.000
Druckdifferenz Zuluftventilator* [Pa]	1.082	1.082	1.082
Druckdifferenz Abluftventilator* [Pa]	903	903	903
Systemwirkungsgrade der Ventilator für Zu- und Abluft	0,510*	0,510*	0,528**

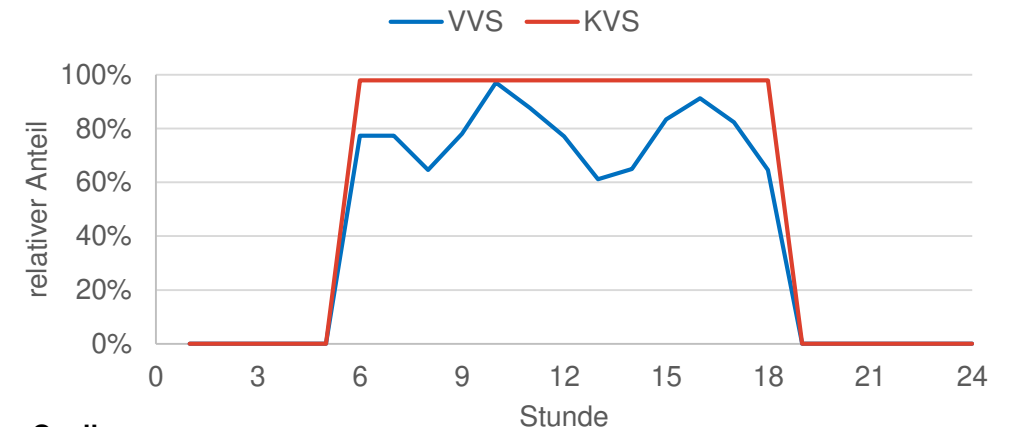
* Ermittelt mit Verkaufsdaten und Trendlinien in der Studie *Chancen der Energetische Inspektion für Gesetzgeber, Anlagenbetreiber und die Branche*, H. Schiller, R. Mai, C. Händel, Fraunhofer IRB Verlag, 2014

** Beispielwert für Stand der Technik

■ Erstellung des Lüftungsprofils für VVS:

- ≡ Lüftungsprofil verschiedener Nutzungsarten
- ≡ Flächenverteilung der Nutzungsarten innerhalb eines typischen Bürogebäudes
- ≡ Gewichtung nach Volumenstrombedarf von jeder Zone
- ≡ Annahme: kein Luftvolumenstrom am Wochenende

Angenommenes Lüftungsprofil am Wochentag



Quellen

- DIN V 18599-10 (2016)
- SIA 2024 (2015)
- *Energetische und wirtschaftliche Bewertung von dezentralen Ventilatoren in zentralen Lüftungsanlagen*, N. Alsen, 2017

Ergebnisse Maßnahmen am Einzelgebäude Büro

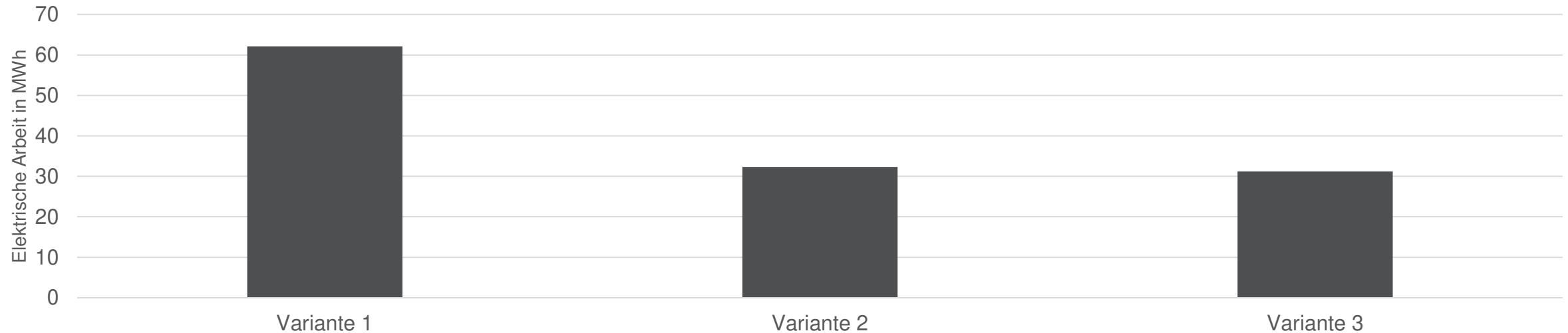
- Eingangsparmeter in Berechnungen für ein Beispielgebäude mit 4.500 m² Nutzfläche

Variante	1: KVS	2: VVS	3: VVS + Ventilatortausch
Volumenstromregelung	KVS	VVS	VVS
Maximaler Volumenstrom [m ³ /h]	18.000	18.000	18.000
Druckdifferenz Zuluftventilator* [Pa]	1.082	1.082	1.082
Druckdifferenz Abluftventilator* [Pa]	903	903	903
Systemwirkungsgrade der Ventilator für Zu- und Abluft	0,510*	0,510*	0,528**

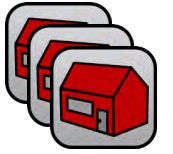
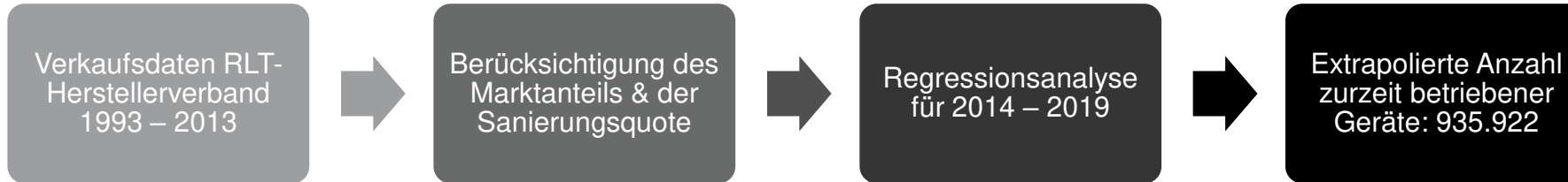
* Ermittelt mit Verkaufsdaten und Trendlinien in der Studie *Chancen der Energetische Inspektion für Gesetzgeber, Anlagenbetreiber und die Branche*, H. Schiller, R. Mai, C. Händel, Fraunhofer IRB Verlag, 2014

** Beispielwert für Stand der Technik

Strombedarf der RLT-Anlage



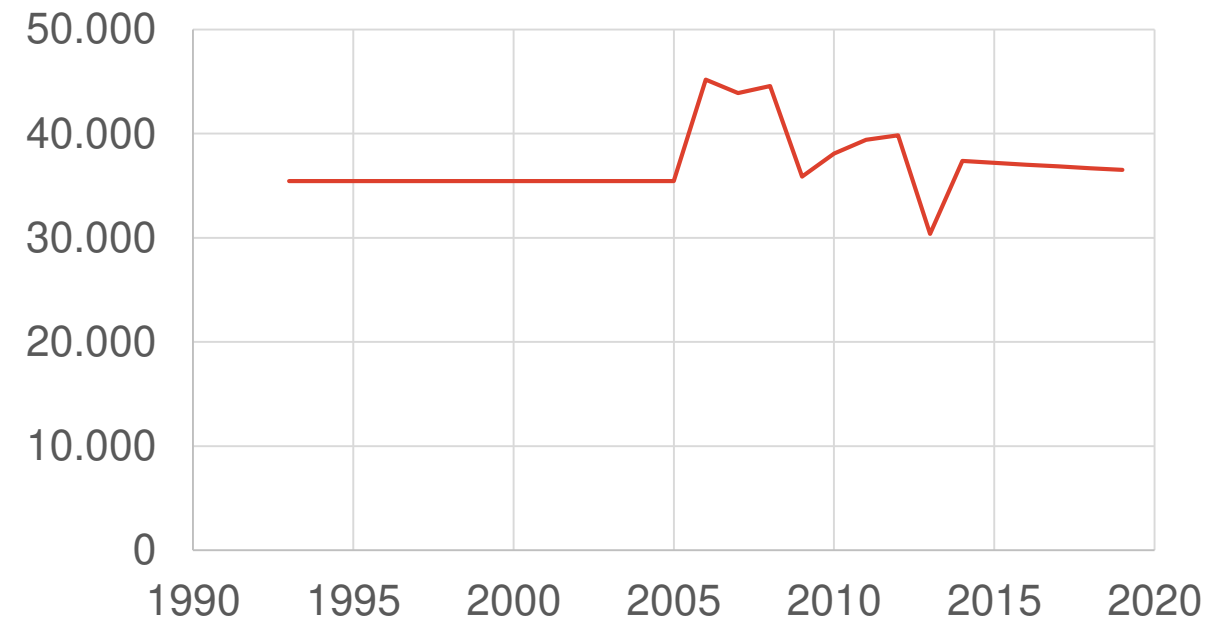
Ableitung Gesamtanzahl RLT-Anlagen im dt. NWG-Bestand



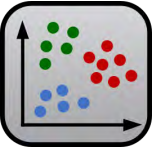
■ Datengrundlage

- ≡ 1993 – 2005: abgeschätzter Mittelwert durch RLT-Herstellerband
- ≡ 2006 – 2013: exakte Verkaufsdaten des RLT-Herstellerbands
- ≡ 2014 – 2019: Regressionsanalyse EBC RWTH Aachen

RLT-Anlagen in Deutschland



Definition von NWG-Kategorien



- Bildungsgebäude
- Büro- und Verwaltungsgebäude
- Fabrikgebäude
- Lagerhallen
- Werkstattgebäude
- Allgemeine Gewerbe- und Industriegebäude
- Handelsgebäude
- Heilbehandlungsgebäude
- Sporthallen
- Schwimmbhallen
- Kulturbauten
- Beherbergungsgebäude
- Gaststätten und Restaurants



NWG-Kategorien - Gebäudeanteile	
Bildungsgebäude	4.7 %
Büro- und Verwaltungsgebäude	9.8 %
Gewerbe- und Industriegebäude	59.5 %
Handelsgebäude	10.2 %
Heilbehandlungsgebäude	4.2 %
Gaststätten und Restaurants	3.7 %
Kultur, Sport, Herberge	7.9 %

Nichtwohngebäudekategorien

Quelle: Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude

Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzialen, BMVBS, 2013

Aufteilung der RLT-Anlagen auf NWG-Kategorien



Distanzbasierter Verteilungsalgorithmus

- Grundlage: Volumenströme der RLT-Verkaufsdaten
- Entfernung des Volumenstroms eines einzelnen Gerätes zu mittlerem Volumenstrom einer NWG-Kategorie bestimmt Wahrscheinlichkeit der Zuordnung zu dieser Kategorie



Gebäudeverteilung

- Zusätzliche Gewichtung des Gebäudeanteils jeder Kategorie in Deutschland



erzeugung		1	2	3	4	5	6
essel Öl/Gas	überwiegend						
ärme	selten						
Biomasse	sehr selten						
	sehr selten						
ieübergabe		1	2	3	4	5	6
he Heizflächen	überwiegend						
nheizung	selten						
izung	gar nicht						
warmwassererzeugung		1	2	3	4	5	6
	sehr selten						
tral elektrisch	oft						
armwasser							
chtung							
stoffröhre							
NaQL							
anische Lü							
e vorhanden							
tisierung							
vorhanden							

Ausstattungs-wahrscheinlichkeit

- Zusätzliche Gewichtung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Gebäude einer Kategorie mit einer RLT-Anlage ausgestattet ist

Aufteilung der RLT-Anlagen auf NWG-Kategorien: Verteilungsalgorithmus

■ Festlegen mittlerer Volumenströme pro NWG-Kategorie



Distanzbasierter Verteilungsalgorithmus

- Grundlage: Volumenströme der RLT-Verkaufsdaten
- Entfernung des Volumenstroms eines einzelnen Gerätes zu **mittlerem Volumenstrom einer NWG-Kategorie** bestimmt Wahrscheinlichkeit der Zuordnung zu dieser Kategorie

Quellen

* SIA 2024

** Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzialen, BMVBS, 2013



	Mittlerer Volumenstrom je Gerät [m ³ /h]
Bildungsgebäude	11.319
Büro- und Verwaltungsgebäude	4.053
Gewerbe- und Industriegebäude	1.750
Handelsgebäude	2.045
Heilbehandlungsgebäude	2.341
Gaststätten und Restaurants	1.569
Kultur, Sport, Herberge	4.432

Aufteilung der RLT-Anlagen auf NWG-Kategorien: Gebäudeverteilung



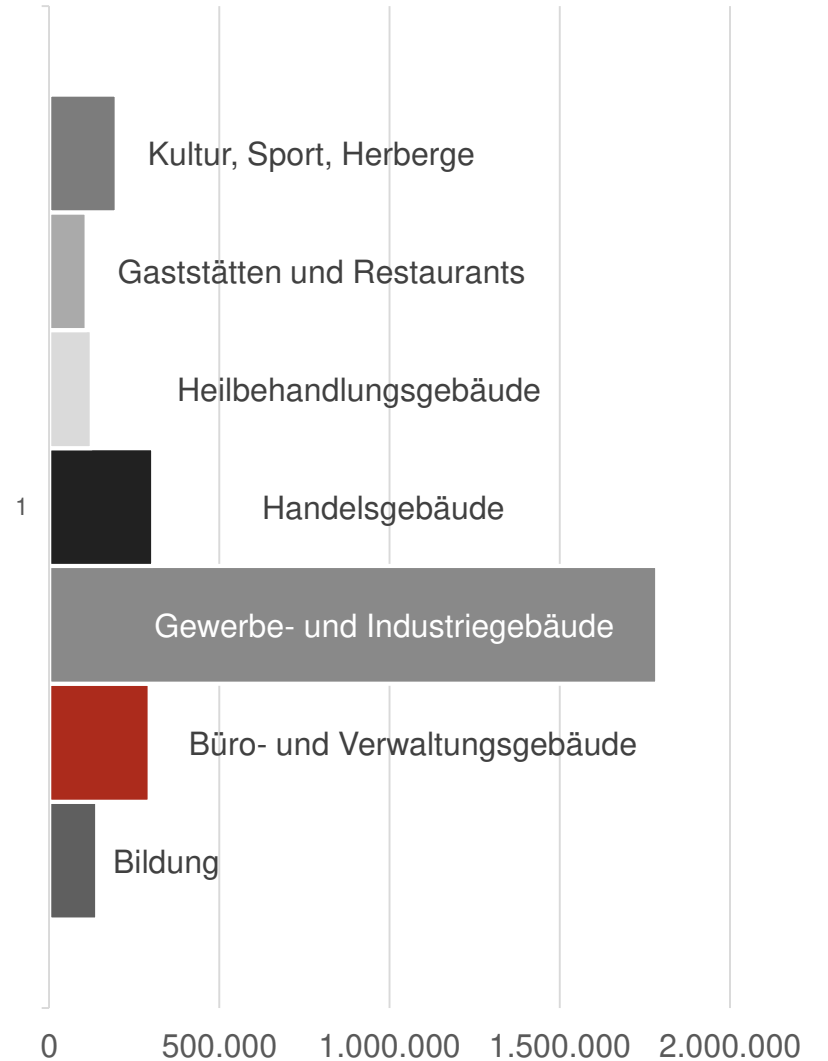
Distanzbasierter Verteilungsalgorithmus

- Grundlage: Volumenströme der RLT-Verkaufsdaten
- Entfernung des Volumenstroms eines einzelnen Gerätes zu mittlerem Volumenstrom einer NWG-Kategorie bestimmt Wahrscheinlichkeit der Zuordnung zu dieser Kategorie



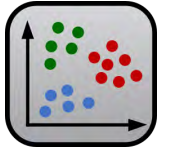
Gebäudeverteilung

- Zusätzliche Gewichtung des Gebäudeanteils jeder Kategorie in Deutschland



Aufteilung der RLT-Anlagen auf NWG-Kategorien: RLT-Ausstattungswahrscheinlichkeiten

- Anlagentechnik variiert je nach NWG-Kategorie
- Ableitung von Ausstattungswahrscheinlichkeit für RLT



Wärmeerzeugung		1	2	3	4	5	6	7
Heizkessel Öl/Gas	überwiegend		■					
Fernwärme	selten					■		
festе Biomasse	sehr selten						■	
BHKW	sehr selten							■
Wärmeübergabe		1	2	3	4	5	6	7
statische Heizflächen	überwiegend		■					
Flächenheizung	selten					■		
Luftheizung	gar nicht							■
Trinkwarmwassererzeugung		1	2	3	4	5	6	7
zentral	sehr selten							■
dezentral elektrisch	oft			■				
kein Warmwasser	gelegentlich				■			
Beleuchtung		1	2	3	4	5	6	7
Leuchtstoffröhre	immer	■						
HQL / NaQL	gar nicht							■
mechanische Lüftung		1	2	3	4	5	6	7
Anlage vorhanden	sehr selten							■
Klimatisierung		1	2	3	4	5	6	7
Anlage vorhanden	gar nicht							■

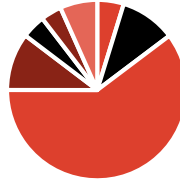


Ausstattungswahrscheinlichkeiten für verschiedene gebäudetechnische Anlagen
 Quelle: Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland, BMVBS, 2011

Aufteilung der RLT-Anlagen auf NWG-Kategorien



1. Distanzbasierter Verteilungsalgorithmus

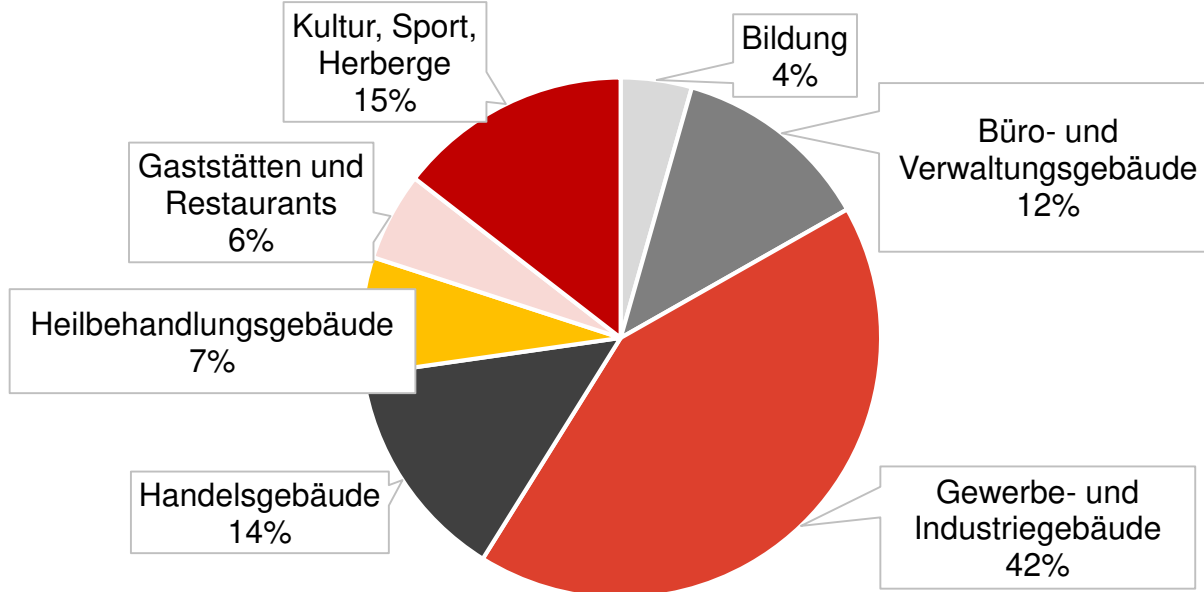


2. NWG-Gebäudeverteilung

RLT-System	1	2	3	4	5	6	7
mechanisch Direkt	überwiegend						
Fernwärme	selten						
Feste Biomasse	sehr selten						
Ganz	sehr selten						
Wärmepumpe							
statische Heißeinheiten	überwiegend						
Flächenheizung	selten						
Luftionisierung	gar nicht						
Elektronenwassererwärmung							
zentral	sehr selten						
dezentral elektrisch	oft						
kein Warmwasser	gelegentlich						
Balkenheizung							
Leuchtstoffröhre	immer						

3. RLT-Ausstattungs-wahrscheinlichkeiten

Verteilung RLT-Anlagen



Anzahl RLT-Anlagen

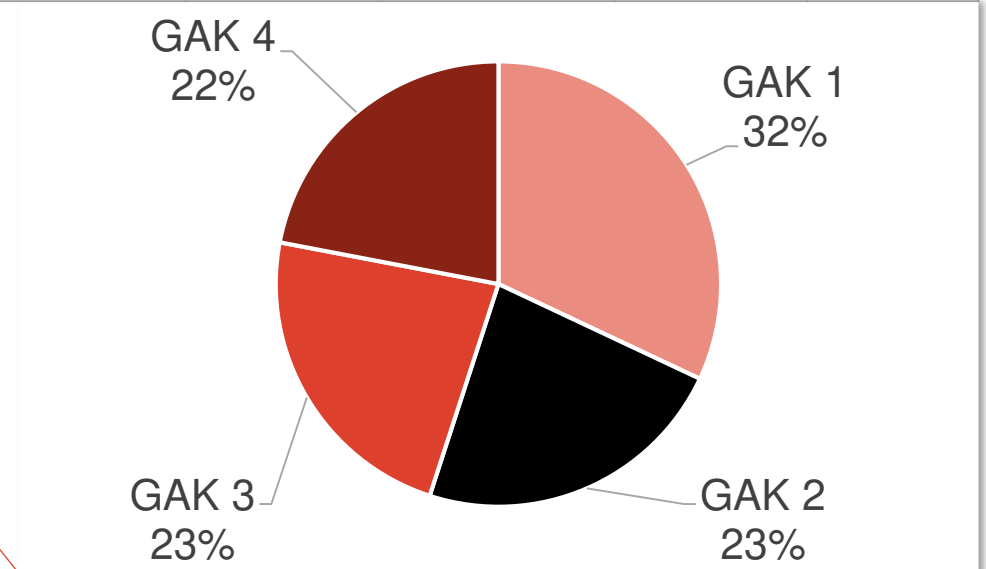
Bildungsgebäude	41.274
Büro- und Verwaltungsgebäude	115.867
Gewerbe- und Industriegebäude	393.930
Handelsgebäude	129.719
Heilbehandlungsgebäude	68.042
Gaststätten und Restaurants	51.289
Kultur, Sport, Herberge	135.802
Gesamt:	935.922

Fokus Büro- und Verwaltungsgebäude (BuV)

■ Berücksichtigung des Gerätealters

Hochrechnung – Anzahl RLT-Anlagen	
Bildungsgebäude	41.274
Büro- und Verwaltungsgebäude	115.867
Gewerbe- und Industriegebäude	393.930
Handelsgebäude	129.719
Heilbehandlungsgebäude	68.042
Gaststätten und Restaurants	51.289
Kultur, Sport, Herberge	135.802
Gesamt:	935.922

Gerätealtersklasse ermittelt aus Verkaufsdaten RLT-Herstellerverband				
Klasse	GAK 1	GAK 2	GAK 3	GAK 4
Jahre	bis 2001	2002 bis 2007	2008 bis 2013	ab 2014



■ Gerätealtersklasse

- ≡ Unterschiedliche Ventilatorwirkungsgrade
- ≡ Unterschiedliche Verteilung der KVS- und VVS-betriebenen Anlagen in Deutschland

Anlagensimulation und Wirtschaftlichkeitsberechnung für BuV in Deutschland



Maßnahme 1

Umstellung von Konstanter Volumenstromregelung (KVS) auf variable Volumenstromregelung (VVS)



Maßnahme 2

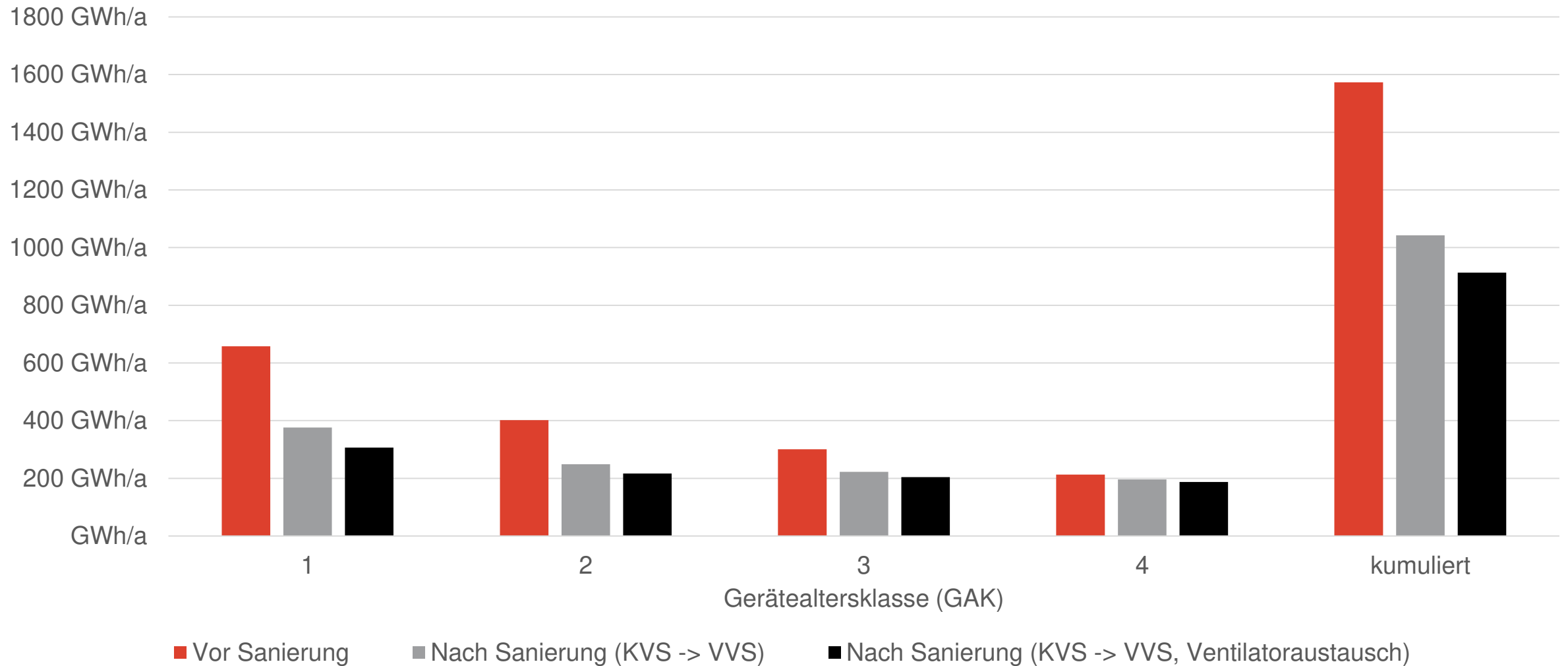
Maßnahme 1 + Steigerung des Ventilatorwirkungsgrads durch Austausch des Ventilators

Randbedingungen

Ökonomisch	
Nutzungsdauer	15 a
Nominalzins	2,2 %
Inflationsrate	1,4 %
Realzins	0,8 %
Rentenbarwertfaktor	14,08
Instandhaltung und -setzung anteilig an Investition pro Jahr	2,35 %
Stromkosten	16,4 ct./kWh
Ökologisch	
Emissionsfaktor Strom	518 g/kWh
Emissionen Herstellung	500 g/€-Invest
Emissionen Wartung	220 g/€-Wartung

Detailbetrachtung Büro- und Verwaltungsgebäude (BuV)

Strombedarf aller BuV-Gebäude in Deutschland mit masch. Lüftungsanlage



CO₂-Vermeidungskosten der Luftförderung für den Bestand der Büro- und Verwaltungsgebäude



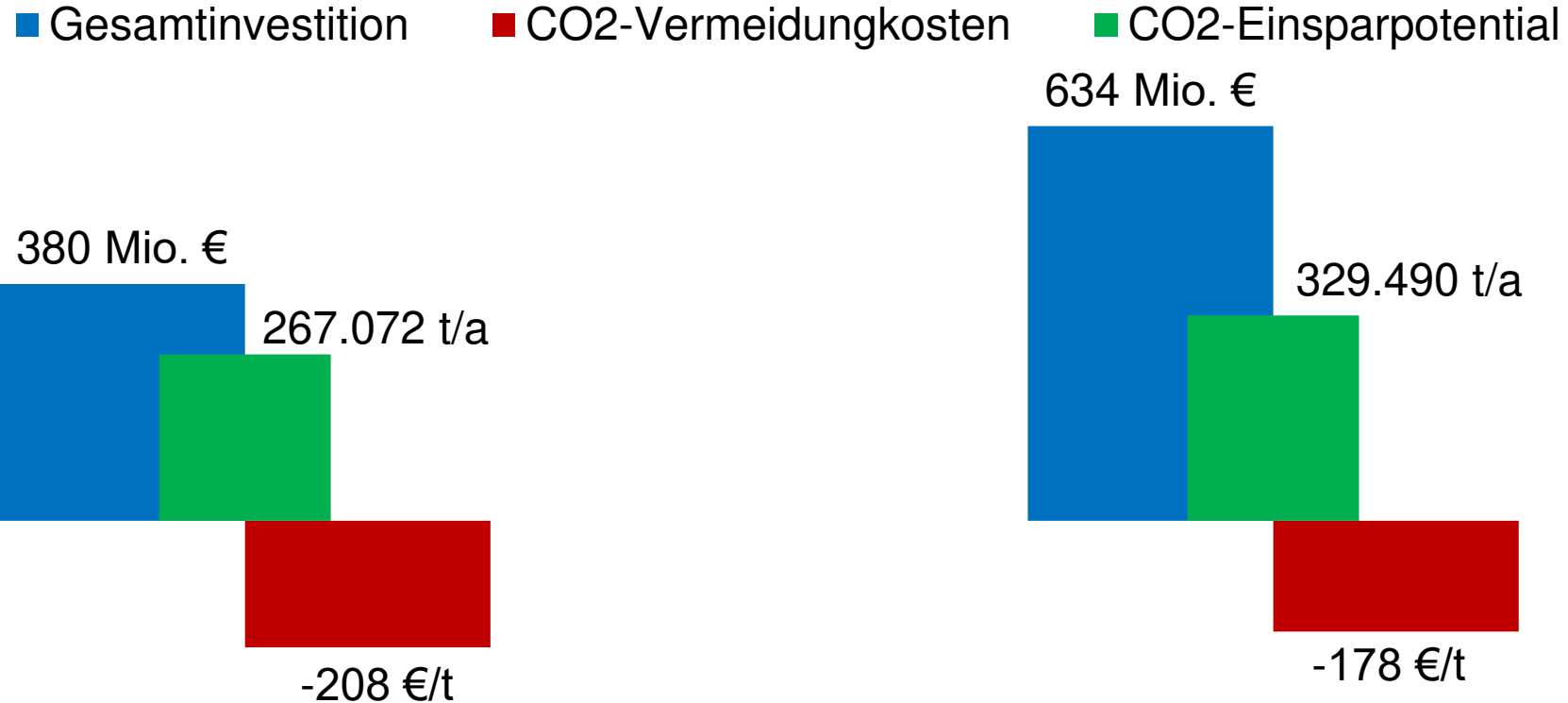
Maßnahme 1

Umstellung von Konstanter Volumenstromregelung (KVS) auf variable Volumenstromregelung (VVS)



Maßnahme 2

Maßnahme 1 + Steigerung des Ventilatorwirkungsgrads durch Austausch des Ventilators



Gutachten über CO₂-Vermeidungskosten in der Klimakältetechnik

ILK Dresden



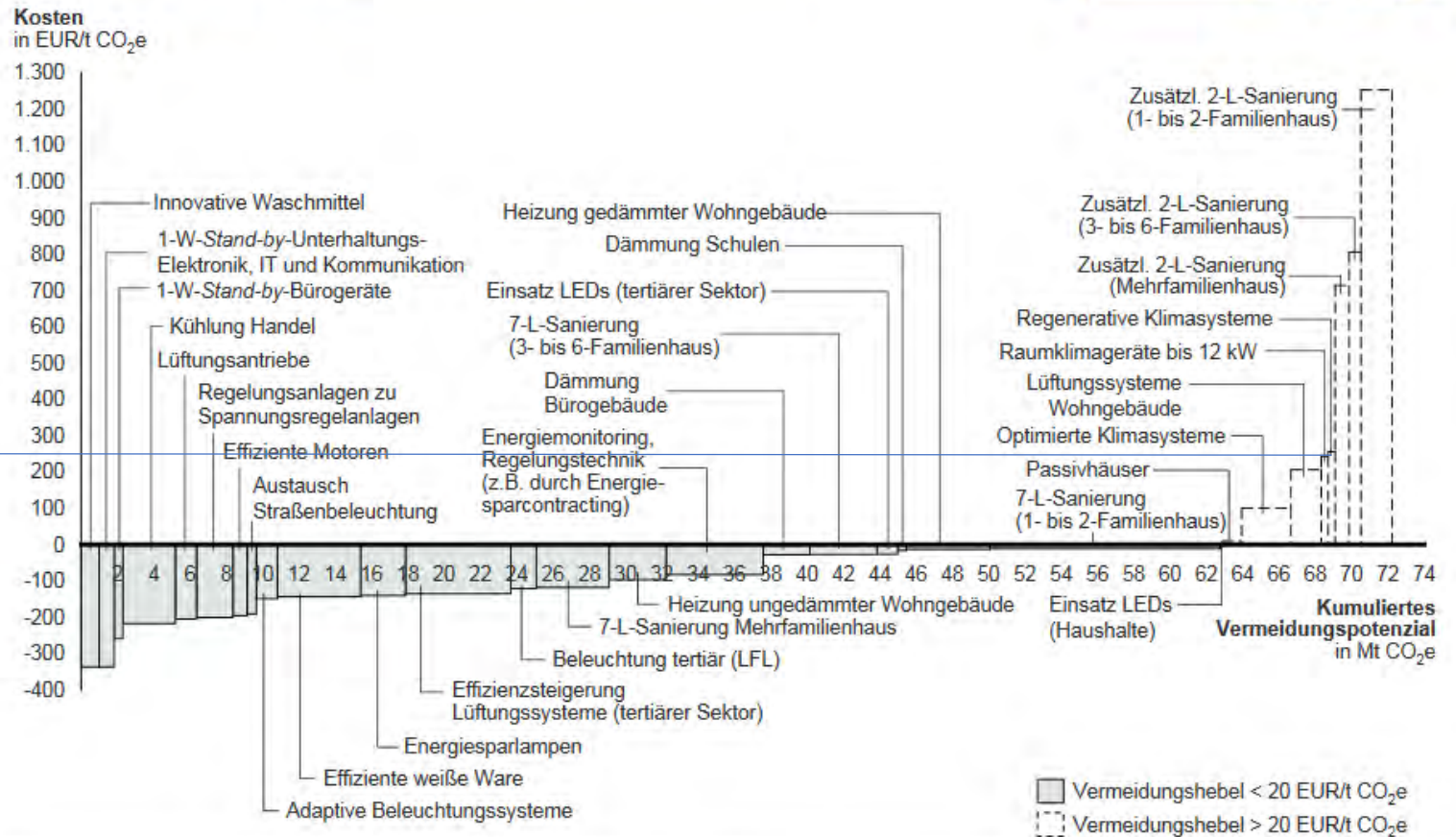
Institut für Luft- und Kältetechnik
gemeinnützige Gesellschaft mbH

CO₂-Vermeidungskosten in der Klimakältetechnik

Gebäudesektor: Vermeidungskostenkurve – Deutschland 2020

BASISSZENARIO 2008
FÜR 2020

ENTSCHEIDER-
PERSPEKTIVE



McKinsey:
Raumklimageräte ca. 250 €/t CO₂

Quelle: Studie "Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland" von McKinsey & Company, Inc., im Auftrag von "BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz" – AG Gebäude

Beispielberechnung - Randbedingungen

Berechnungsrandbedingungen	Stand 2018	Prognose 2020 - 2035	
Energiekosten Strom	16,4	20	ct/kWh
CO2-Emissionsfaktor Strom	518	405	g_CO2/kWh
Energiekosten Wärme	6,2	7,6	ct/kWh
CO2-Emissionsfaktor Wärme (Mix)	303	253	g_CO2/kWh
Nominalzins (Ø 2009-2017)		2,2	%
Inflation (Ø 2009-2017)		1,4	%
--> Realzins (Ø 2009-2017)		0,8	%
Nutzungsdauer		15	a
Barwertfaktor		14,08	-
Annuitätsfaktor		0,071	-

Gebäudeeigenschaften	Variante 1	Variante 2
Nutzfläche	1.500 m ²	3x 1.500 m ²
Gebäudeart	Büro- und Verwaltungsgebäude	
Nutzungsart	Großraumbüro	
Nutzungszeit täglich	12 h/d	
Nutzungszeit wöchentlich	250 d/a	
Nutzungsstunden jährlich	3000 h/a	
hyg. Mindestaußenluftvolumenstrom spez.	6 m ³ /h je m ²	
Kühllast spez.	25 W/m ²	
Kühllast abs.	37,5 kW	112,5 kW
Feuchteanforderung Raum	mit Toleranz (6 < x < 10 g/kg)	

Beispielberechnung - Anlageneigenschaften

		Basisvariante (Baujahr 2005)	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a
Anlageneigenschaften		Nur-Luft-System mit Umluft	Nur-Luft-System mit WRG	Luft-Wasser-System mit WRG	Nur-Luft-System mit WRG
RLT-Kühlung	Teilklimaanlage	Kühlung und Entfeuchtung	Kühlung und Entfeuchtung	Kühlung und Entfeuchtung	Kühlung und Entfeuchtung
	Umluft	35%	keine	keine	keine
	Wärmerückgewinnung	keine	75%	75%	75%
	Feuchterückgewinnung	keine	keine	keine	keine
	Zulufttemperatur	18°C	18°C	18°C	18°C
	Betriebszeit täglich	13 h/d	13 h/d	13 h/d	13 h/d
	Betriebstage	250 d/a	250 d/a	250 d/a	250 d/a
	Betriebsstunden jährlich	3250 h/a	3250 h/a	3250 h/a	3250 h/a
	hyg. Mindestaußenluftvolumenstrom	9.000 m³/h	9.000 m³/h	9.000 m³/h	3x 9.000 m³/h
	Kühllastabh. Volumenstrom (dT = 8K)	14.000 m³/h	14.000 m³/h	9.000 m³/h	3x 14.000 m³/h
	Volumenstromregelung	KVS	VVS	VVS	VVS
	Umluftanteil Sommer	35%	0	0	0
	Bedarfsabhängige Volumenstromregelung	C1	C3	C6	C3
	mittlerer Außenluftvolumenstrom [m³/h]	14.000	14.000	7.950	42.000
	sens. Kühlleistung Raum	37.500 W	37.500 W	24.200 W	112.500 W
	Leistungsanteil RLT-Kühlung	100%	100%	65%	100%
	Kaltwasservorlauftemperatur RLT	6°C	8°C	8°C	8°C
	sens. Kühlleistung RLT-Kühlregister	84.600 W	75.200 W	48.350 W	3x 75.200 W
	lat. Kühlleistung RLT-Kühlregister	29.900 W	37.800 W	24.300 W	3x 37.800 W
	ges. Kühlleistung RLT-Kühlregister	114.500 W	113.000 W	72.650 W	3x 113.000 W
	Nutzenergiebedarf RLT-Kühlung (18°C, 3250h)	2.283 Wh/(m³/h)	2.243 Wh/(m³/h)	2.243 Wh/(m³/h)	2.243 Wh/(m³/h)
	Zuschlag Verteilung, Speicherung, Übergabe	1,34	1,3	1,3	1,3
	Erzeugernutzkälteabgabe RLT [kWh/a]	42.829	40.823	23.181	122.468
Raumkühlung	Flächenkühlung (z.B. Kühldecke)	nicht vorhanden	nicht vorhanden	vorhanden	nicht vorhanden
	Kaltwasservorlauftemperatur Raumkühlung	nicht vorhanden	nicht vorhanden	14°C	nicht vorhanden
	sens. Kühlleistung	0 W	0 W	13.300 W	0 W
	Leistungsanteil Raumkühlung	0%	0%	35%	0%
	Vollbenutzungsstunden	-	-	500 h/a	-
	Nutzenergiebedarf Raum-Kühlung	-	-	6.650 kWh/a	-
	Zuschlag Verteilung, Speicherung, Übergabe	-	-	1,17	-
	Erzeugernutzkälteabgabe Raum [kWh/a]	0	0	7.781	0

Beispielberechnung - Anlageneigenschaften

		Basisvariante (Baujahr 2005)	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a
Kälteerzeugung	Kälteerzeuger ==> Kaltwassersatz	Scrollverdichter luftgekühlt	Kolbenverdichter luftgekühlt	Kolbenverdichter luftgekühlt	Turboverdichter luftgekühlt
	Freie Kühlung	nicht vorhanden	integriert	integriert	integriert
	Nennleistung Kälteerzeuger	120 kW	120 kW	86 kW	350 kW
	Nennleistungszahl EER Standardwert	2,3	2,6	2,6	3,3
	Baujahrfaktor	1	1,1	1,1	1,1
	Temperaturkorrekturfaktor Vorlauftemperatur RLT	1	1,05	1,05	1,05
	Temperaturkorrekturfaktor Vorlauftemperatur Raum	1	1	1,25	1
	Temperaturkorrekturfaktor RLT + Raum	1,00	1,05	1,12	1,05
	Nennleistungszahl EER	2,30	3,00	3,19	3,81
	Teillastregelart	taktend (EIN/AUS)	mehrstufig schaltbar	mehrstufig schaltbar	Inverterregelung
	Teillastfaktor PLV RLT	1,15	1,28	1,28	1,61
	Teillastfaktor PLV Raum	1,28	1,4	1,4	1,69
	Teillastfaktor PLV RLT + Raum	1,15	1,28	1,32	1,61
	Jahresarbeitszahl SEER	2,65	3,84	4,20	6,14
	Freikühlfaktor RLT (1 = keine Freie Kühlung)	1	1,01	1,01	1,01
	Freikühlfaktor Raum (1 = keine Freie Kühlung)	1	1	1,05	1
	Freikühlfaktor RLT + Raum	1	1,01	1,02	1,01
	Jahresarbeitszahl SEER_FC	2,65	3,88	4,28	6,20
		100%	147%	162%	234%
	Erzeugernutzkälteabgabe RLT+Raum [kWh/a]	42.829	40.823	30.962	122.468
	Vollbenutzungsstunden	357	340	360	350
	Endenergiebedarf RLT+Raum [kWh/a]	16.192	10.515	7.237	19.760
		100%	65%	45%	41%

Beispielberechnung – CO₂-Bilanz

Stand 2018

		Basisvariante (Baujahr 2005)	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a
CO₂-Bilanz	Kältemittel	R407C	R290 (Propan)	R290 (Propan)	R1234ze
	GWP ₁₀₀	1774	3	3	1
	Kältemittelfüllmenge [kg]	21	8	6	135
	Nutzungsdauer [a]	15	15	15	15
	jährliche Leckrate [UBA 2013]	4%	3%	3%	3%
	Entsorgungsverlust [UBA 2013]	30%	30%	30%	30%
	direkter Anteil Leckage [kg CO ₂]	22.352	11	8	61
	direkter Anteil Entsorgung [kg CO ₂]	26.078	17	13	95
	direkter Anteil Leckage + Entsorgung [kg CO ₂]	48.430	28	21	155
		100%	0,06%	0,04%	0,32%
	indirekter Anteil Energie [kg CO ₂]	125.815	81.702	56.235	153.532
		100%	65%	45%	
	TEWI [kg CO₂/a]	11.616	5.449	3.750	10.246
	%	100%	47%	32%	29%
	Differenz [kg CO₂/a]	0	-6.168	-7.866	-24.603

Beispielberechnung – Wirtschaftlichkeit

Stand 2018

Basisvariante (Baujahr 2005) Variante 1a

Variante 1b

Variante 2a

Wirtschaftlichkeit (in Anlehnung an VDI 2067-1)

kapitalgebundene Kosten

		weiter genutzt	in Kosten RLT enthalten	weiter genutzt
RLT-Kühlung (Kühlregister, Regelkreis)				
Raumkühlung (Flächenkühlsystem)		0 €	25.000 €	0 €
Rohrleitungen und Zubehör		2.500 €	5.000 €	7.500 €
spez. Kosten luftgekühlte KKM [€/kW]		200	250	200
Kälteerzeugung		24.000 €	21.500 €	70.000 €
MSR-Technik		5.300 €	8.000 €	6.500 €
Investition gesamt	30.000 €	31.800 €	59.500 €	84.000 €
spez. Kosten je kW Kälteleistung	250 €	265 €	599 €	240 €
Investitionskosten jährlich (dynamisch)	0 €	2.258 €	4.225 €	5.965 €
Investitionskosten gesamt (dynamisch)	0 €	33.873 €	63.379 €	89.476 €

bedarfsgebundene Kosten

Endenergiebedarf RLT+Raum [kWh/a]	16.192	10.515	7.237	19.760
Bedarfsgeb. Kosten Elektroenergie jährlich	2.656 €	1.724 €	1.187 €	3.241 €
Bedarfsgeb. Kosten Elektroenergie 15a	39.833 €	25.867 €	17.804 €	48.609 €
Differenz	0 €	-13.966 €	-22.029 €	-70.892 €

betriebsgebundene Kosten

Bedienung [h/a]	1	1	1	1
Wartung und Inspektion [% der Investition/a]	1,5	1,5	1,5	1,5
Instandsetzung [% der Investition/a]	5	2,35	2,35	2,35
Betriebsgebundene Kosten jährlich	218 €	167 €	243 €	310 €
Betriebsgebundene Kosten 15a	3.277 €	2.504 €	3.640 €	4.645 €
Differenz	0 €	-773 €	363 €	-5.187 €
CO ₂ -Einsparung Wartung/Instands. 15a bei 220g/€ [kg CO ₂]	0	-170	80	-1.141

Beispielberechnung – Ergebnisse

Stand 2018

	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a
Amortisation			
Differenz Investition	33.873 €	63.379 €	89.476 €
Differenz Bedarf und Betrieb 15a	-14.739 €	-21.666 €	-76.078 €
Amortisationsdauer	34,5	43,9	17,6
monetärer Hebel (€/€)	-0,44	-0,34	-0,85

CO2-Vermeidungskosten

CO2-Einsparung 15a [kg CO2]	92.516	117.990	369.049
CO2-Einsparung Wartung 15a [kg CO2]	170	-80	1.141
CO2-Emission Herstellung bei 500g/€ Invest [kg CO2]	-15.900	-29.750	-42.000
CO2-Vermeidungspotential [kg CO2]	76.786	88.160	328.191
Kosten abzgl. Einsparungen 15a	19.134 €	41.712 €	13.398 €
CO2-Intensität [kg CO2/€]	4,0	2,1	24,5
CO2-Vermeidungskosten [€/t CO2]	249 €	473 €	41 €

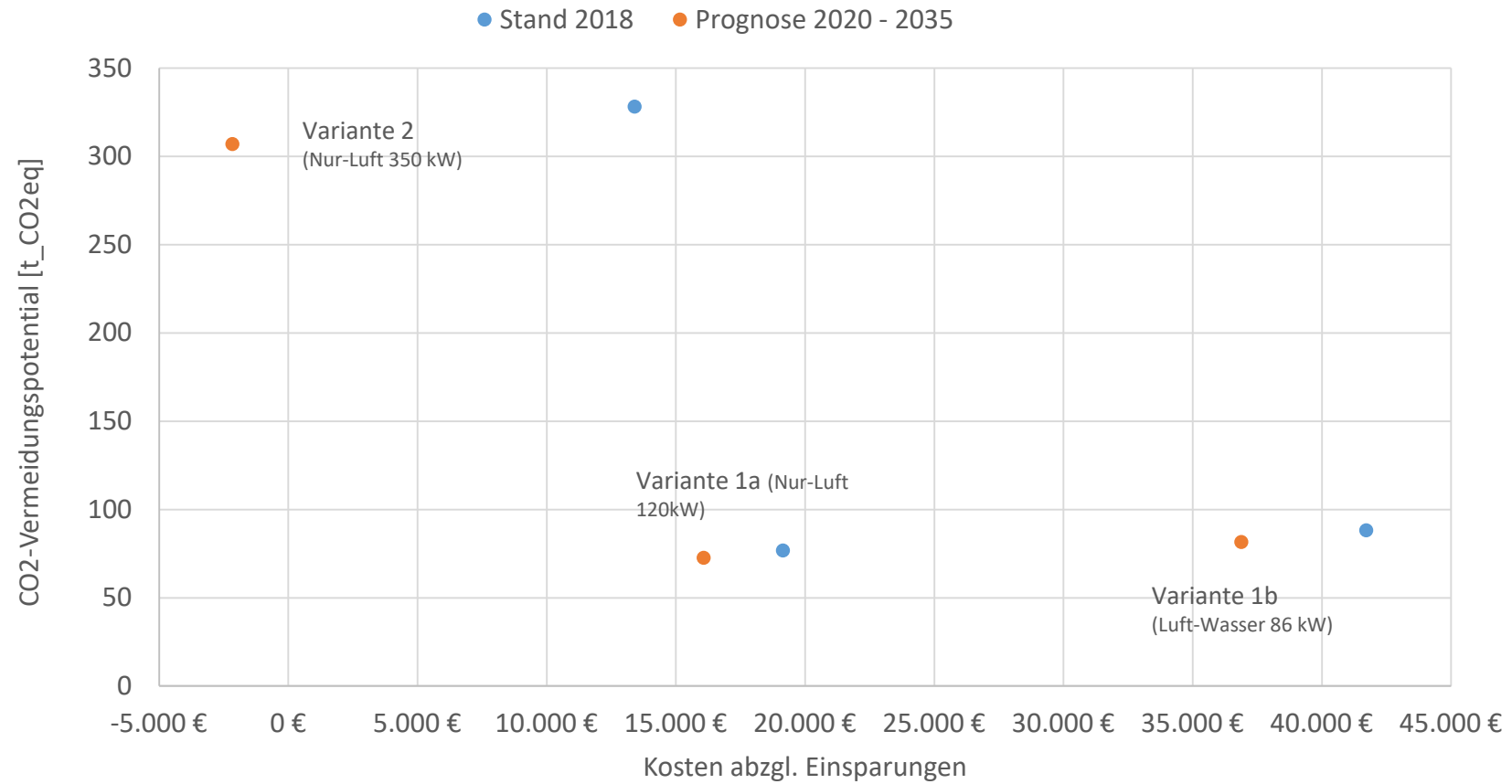
Prognose 2020 -2035

	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a
Amortisation			
Differenz Investition	33.873 €	63.379 €	89.476 €
Differenz Bedarf und Betrieb 15a	-17.805 €	-26.502 €	-91.640 €
Amortisationsdauer	28,5	35,9	14,6
monetärer Hebel (€/€)	-0,53	-0,42	-1,02

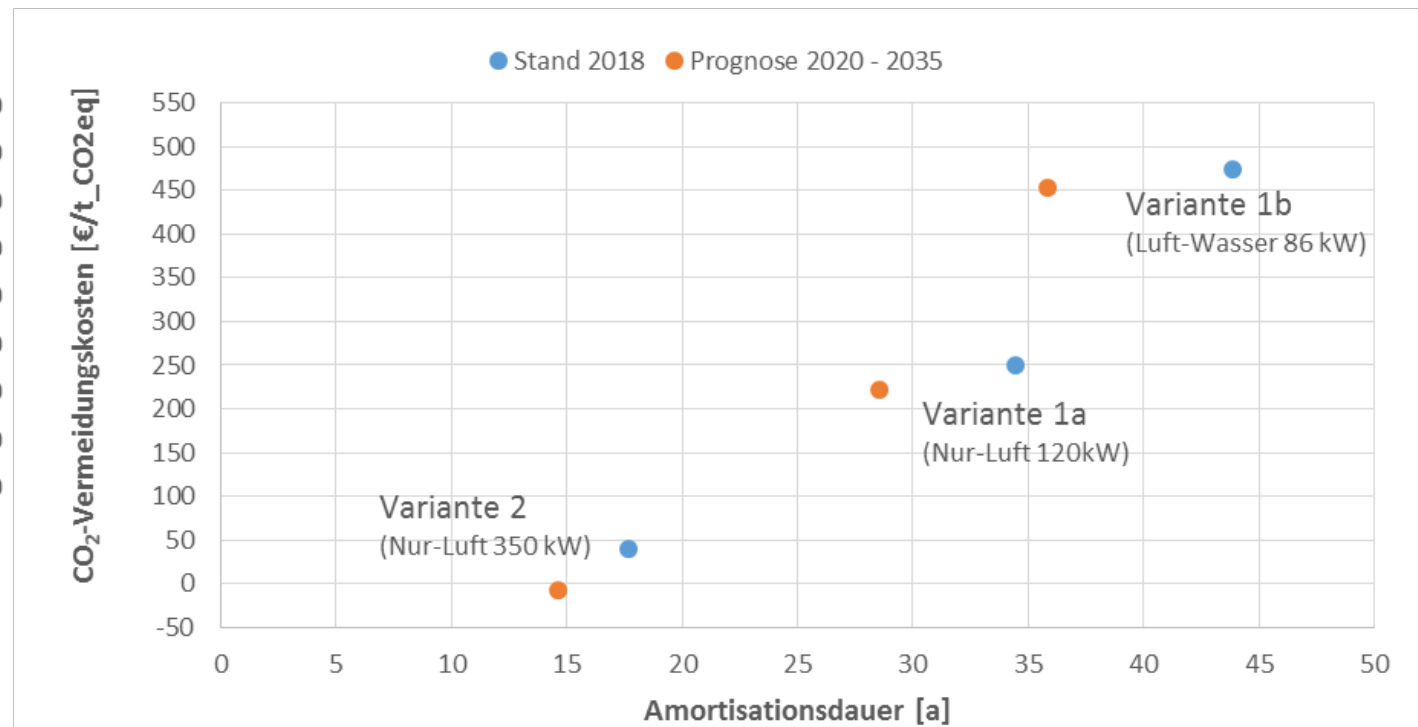
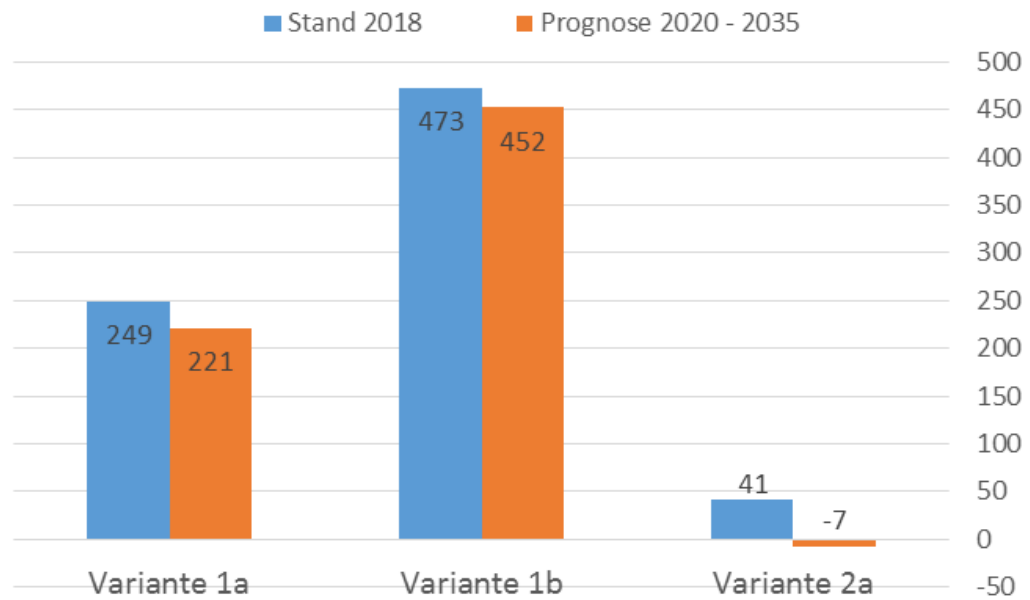
CO2-Vermeidungskosten

CO2-Einsparung 15a [kg CO2]	88.343	111.408	347.868
CO2-Einsparung Wartung 15a [kg CO2]	170	-80	1.141
CO2-Emission Herstellung bei 500g/€ Invest [kg CO2]	-15.900	-29.750	-42.000
CO2-Vermeidungspotential [kg CO2]	72.613	81.578	307.009
Kosten abzgl. Einsparungen 15a	16.068 €	36.877 €	-2.164 €
CO2-Intensität [kg CO2/€]	4,5	2,2	-141,9
CO2-Vermeidungskosten [€/t CO2]	221 €	452 €	-7 €

CO₂-Vermeidungspotential [t_CO_{2eq}]



CO₂-Vermeidungskosten [€/t_CO_{2eq}]

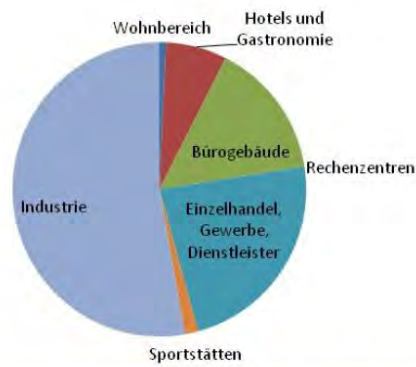


Schlussfolgerung Klimakälte

- Sehr hohes CO₂-Vermeidungspotential durch Kältemiteleinfluss
- Aber: Hohe CO₂-Vermeidungskosten (hoher Anlagenpreis, geringe Vollbenutzungstunden)
- Verdopplung der Vermeidungskosten ohne Berücksichtigung der direkten Emissionen (Leckagen)
- keine Amortisation nur durch Effizienzsteigerung → kein monetärer Hebel (→ Sanierung meist nur nach Verschleiß)
- Starke Abhängigkeit von der Gebäudegröße
- Systemumstellung (Luft-Wasser-System) schneidet schlechter ab als „kleine Lösung“ (1:1 Ersatz)

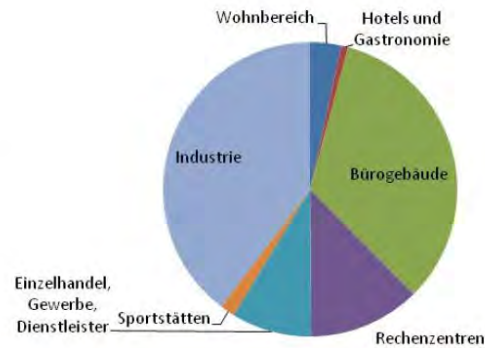
Literaturquellen zum Marktvolumen

Autor	Jahr	Titel	Kühlenergie- bedarf	Endenergie- bedarf	Anzahl Anlagen	Hinweise
			[GWh/a]	[GWh/a]	[Stk.]	
DKV	2002	Statusbericht Nr. 22: "Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte"	32.440	9.640		eigene Berechnungen, Marktabfragen
VDMA	2010	Branchenbericht "Deutscher Markt für Kältetechnik 2009"			2.325.000	Gesamtanzahl für Gebäudeklimatisierung einschl. Raumklimasysteme
Ecofys	2011	"Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung"		14.000 ... 23.000		aus verschiedenen europäischen Studien entnommen
ILK, Schiller engineering	2013	"Chancen der Energetischen Inspektion"			145.706	basierend auf DKV 2002, bezogen auf Energetische Inspektion
ILK, Schiller engineering	2013	"Chancen der Energetischen Inspektion"			146.700	nach JARN und Stat. Bundesamt, einschl. Prozessklima
Schädlich, S.	2013	Vortrag BMU Berlin "Kältetechnologien in Deutschland"		17.856		Anteile differenziert nach Hauptverbrauchssektoren, Prognose bis 2030: 19.896 GWh/a



GESAMTVERBRAUCH 9.640 GWh

Studie 2002



GESAMTVERBRAUCH 17.856 GWh

Studie 2012

	Energiebedarf für Kälteerzeugung [GWh/a]	Prognose 2030 [GWh/a]
Wohnbereich	603	1.200
Hotels und Gastronomie	130	145
Sportstätten	497	497
Bürogebäude	5.900	7.080
Rechenzentren	2.168	2.168
Industrie	7.000	7.000
Einzelhandel, Gewerbe, Dienstleister	1.558	1.806
SUMME	17.856	19.896

Quelle: Schädlich, S.

Marktdaten

Marktdaten Kältemaschinen aus "Chancen der energetischen Inspektion" (2013) Update mit Prognose bis 2030

Quellen (Update):

DKV (2002) Annahme kW/Stk. beruht auf eigenen Schätzungen
 VDMA (2009) Annahme Anzahl RLT-Geräte = Anzahl Kältemaschinen ist nicht realistisch, daher geändert auf 3x RLT je Kältemaschine
 CCI (2011) VRF spielt erst ab 2000 eine Rolle
 Schädlich (2013) Weiterführung / Update von DKV (2002), unveröffentlichter Bericht 2013

DKV-Statusbericht Nr. 22 "Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte" (2002)										VDMA (2009)	
Kälteleistung [MW]	Industrie	Büro/Verwaltung	Einzelhandel	Sportstätten	Hotel/Versammlungsstätten	Wohnbereich	Rechenzentren	Summe [MW] mit Prozesskühlung	kW/Stk. geschätzt	Anzahl [Stk.] mit Prozesskühlung	Stk.
Fenstergeräte	0	0	893	0	0	0	-	1.276	2,5	510.400	800.000
Split, Multisplit	0	2.871	883	0	0	0	-	4.417	5,0	883.400	
Mobile Geräte	0	390	0	0	0	390	-	780	1,0	780.000	1.100.000
Absorber	233	100	226	0	47	0	-	606	400,0	1.515	140.000
Turboverdichter	700	117	583	0	933	0	-	2.333	800,0	2.916	
Kaltwassersätze	9.900	6.500	8.250	1.650	6.600	0	-	32.900	250,0	131.600	
Verflüssiger	1.548	387	1.548	387	0	0	-	3.870	400,0	9.675	
Summe	12.381	10.365	12.383	2.037	7.580	390	-	46.182		2.319.506	2.045.000
Anteil Raumklimasysteme	0%	31%	14%	0%	0%	100%	-	6.473	3,0	2.173.800	1.900.000
Anteil stationäre Kältemaschinen	100%	69%	86%	100%	100%	0%	100%	39.709	272,0	145.706	145.000
Anteil Kaltwassersätze	80%	63%	67%	81%	87%	0%	50%	32.900	250,0	131.600	

Stand 2002:

Elektroenergiebedarf 2002 [GWh/a]	5.090	1.450	2.240	140	570	70	0	9.640			
Jahresarbeitszahl (DKV 2002)	3,33	3,25	3,3	3,24	3,34	2,5	4				
Vollbenutzungsstunden (berechnet)	1.369	455	597	223	251	449	7.500				
Leistung [MW]	12.381	10.365	12.383	2.037	7.580	390	0	46.182		Anzahl 2002 [Stk.]	
Leistung stationär [MW]	12.381	7.104	10.607	2.037	7.580	0	0	39.709	272,0	146.004	
Leistung Kaltwassersätze [MW]	9.900	6.500	8.250	1.650	6.600	0	0	32.900	250,0	131.600	

Stand 2013:

	138%	407%	70%	355%	23%	861%					
Elektroenergiebedarf 2013 [GWh/a]	7.000	5.900	1.558	497	130	603	2.168	17.856	+85%	breitere Datenbasis als 2002	
Jahresarbeitszahl (DKV 2002 +10%)	3,66	3,58	3,63	3,56	3,67	2,75	4,40		+10%	Erweiterung der Marktteilnehmer (RZ)	
Vollbenutzungsstunden (2013)	1.500	1.000	1.000	1.500	250	250	7.500				
Leistung [MW]	17.094	21.093	5.656	1.181	1.910	6.633	1.272	54.838		Anzahl 2013 [Stk.]	
Leistung stationär [MW]	17.094	14.456	4.844	1.181	1.910	0	1.272	40.758	272,0	149.861	
Leistung Kaltwassersätze [MW]	13.669	13.227	3.768	957	1.663	0	636	33.920	250,0	135.679	+3%
Anzahl Kaltwassersätze [Stk.]	54.674	52.909	15.072	3.826	6.654	0	2.544	135.679			
Energiebedarf Kaltwassersätze [GWh/a]	5.597	3.700	1.038	403	113	0	1.084	11.935			

Prognose 2030:

Elektroenergiebedarf 2030 [GWh/a]	7.000	7.080	1.806	497	145	1.200	2.168	19.896	+106%	veränderte Klimabedingungen?	
Jahresarbeitszahl (2013 +10%)	4,03	3,93	3,99	3,92	4,04	3,03	4,84		+10%		
Vollbenutzungsstunden (2013)	1.500	1.000	1.000	1.500	250	250	7.500				
Leistung [MW]	18.803	27.842	7.211	1.299	2.344	14.520	1.399	73.419	+10%	Anzahl 2030 [Stk.]	
Leistung stationär [MW]	18.803	19.083	6.177	1.299	2.344	0	1.399	49.105	272,0	180.552	
Leistung Kaltwassersätze [MW]	15.035	17.460	4.804	1.052	2.041	0	700	41.093	250,0	164.371	+25%
Anzahl Kaltwassersätze [Stk.]	60.142	69.840	19.218	4.209	8.164	0	2.798	164.371			
Energiebedarf Kaltwassersätze [GWh/a]	5.597	4.440	1.203	403	126	0	1.084	12.853			

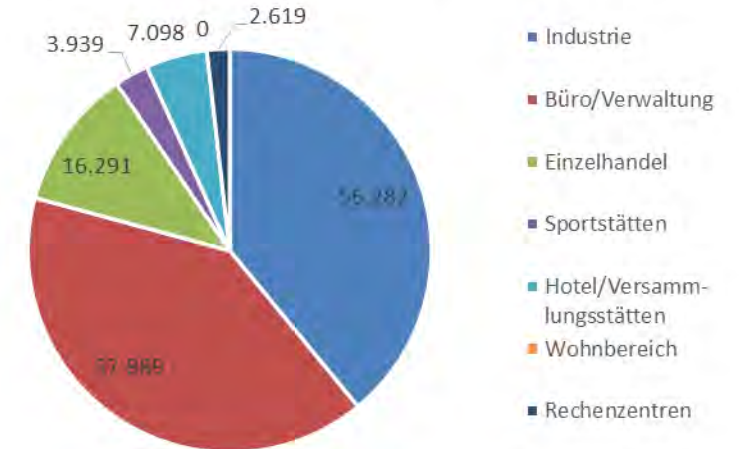
Interpolation 2018:

Leistung Kaltwassersätze [MW]	14.071	14.472	4.073	985	1.775	0	655	36.029	250,0	144.118	+10%
Anzahl Kaltwassersätze [Stk.]	56.282	57.889	16.291	3.939	7.098	0	2.619	144.118			
Energiebedarf Kaltwassersätze [GWh/a]	5.597	3.918	1.087	403	117	0	1.084	12.205			

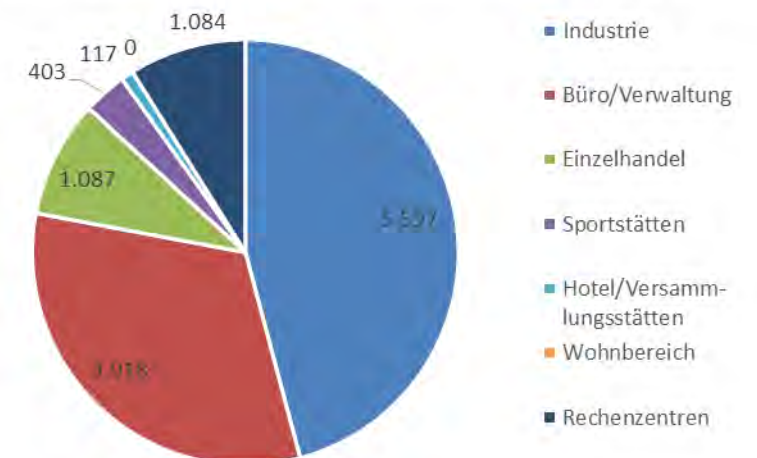
Marktdaten Kaltwassersätze

- Annahme: gesamte RLT-Kühlung durch Kaltwassersätze (Anteil RLT-integrierte Kälte sehr gering und nicht bekannt)
 - ca. 132.000 Stk. Kaltwassersätze im Jahr 2002 in Betrieb (abgeleitet aus [DKV2002] und [JARN])
 - starker Anstieg (+85%) des Endenergiebedarfes zur Kälteerzeugung von 2002 nach 2013
 - höherer Klimatisierungsgrad
 - verbesserte Datenbasis
 - neue Marktteilnehmer (Rechenzentren)
 - realistischere Ansätze für die Kühlbetriebsstunden
 - aber: nur geringe Erhöhung (+3%) des Anlagenbestandes auf ca. 136.000 Stk. durch
 - höhere Effizienz (Annahme: +10%)
 - höhere Maschinenauslastung (Vollbenutzungsstunden)
 - unwesentlicher Anstieg der Kälteanlagenanzahl korreliert mit annähernd konstanten Verkaufszahlen für 2006 – 2011 nach [JARN]
 - prognostizierter Anstieg bis 2030 um ca. 25% auf ca. 165.000 Stk.
 - Annahme 2018: ca. 144.000 Stk. Klimakältemaschinen als Kaltwassersatz im Bestand vorhanden
 - Größter Anteil im Büro- und Industriebereich mit ca. 57.000 Stk. (Industrie hat mit Abstand den größten Endenergiebedarf)
- **Beschränkung auf Kaltwassersätze im BuV-Bereich (58.000 Stk.)**

Anzahl installierter Kaltwassersätze 2018 in D [Stk.]



Endenergiebedarf Kaltwassersätze 2018 in D [GWh/a]



CO₂-Vermeidungskosten [€/t_CO_{2eq}] in Büro- und Verwaltungsgebäuden

Annahmen:

- Beschränkung auf Kaltwassersätze in BuV-Gebäuden
- Marktanteil: 80 ... 95 % Nur-Luft-Systeme (Variante 1a und 2a), 5 ... 20% Luft-Wassersysteme (Variante 1b)

2018	Kälteleistung je Anlage	120 kW (Variante 1a)	86 kW (Variante 1b)	350 kW (Variante 2a)	BuV-Gebäude
Anlage	CO ₂ -Vermeidungspotential [t CO ₂]	77	88	328	
	abs. Kosten abzgl. Einsparungen 15a	19.134 €	41.712 €	13.398 €	
Markt	proz. Anlagenanzahl	50%	10%	40%	100%
	Anlagenanzahl [Stk.]	29.000	5.800	23.200	58.000
	CO ₂ -Vermeidungspotential [t CO ₂]	2.226.786	511.328	7.614.020	10.352.134
	abs. Kosten abzgl. Einsparungen 15a	554.878.149 €	241.932.209 €	310.825.605 €	1.107.635.963 €
	CO ₂ -Vermeidungskosten [€/t CO ₂]	249 €	473 €	41 €	107 €

Prognose	Kälteleistung je Anlage	120 kW (Variante 1a)	86 kW (Variante 1b)	350 kW (Variante 2a)	BuV-Gebäude
Anlage	CO ₂ -Vermeidungspotential [t CO ₂]	73	82	307	
	abs. Kosten abzgl. Einsparungen 15a	16.068 €	36.877 €	-2.164 €	
Markt	proz. Anlagenanzahl	50%	10%	40%	
	Anlagenanzahl [Stk.]	32.500	6.500	26.000	65.000
	CO ₂ -Vermeidungspotential [t CO ₂]	2.359.918	530.257	7.982.246	10.872.421
	abs. Kosten abzgl. Einsparungen 15a	522.208.625 €	239.698.879 €	-56.262.583 €	705.644.921 €
	CO ₂ -Vermeidungskosten [€/t CO ₂]	221 €	452 €	-7 €	65 €

Sensitivitätsanalyse

prozentuale Verteilung der Varianten 1a, 1b, 2a	2018	Prognose 2020 -2035
55/5/40	101	59
50/5/45	93	50
45/10/45	98	56
50/10/40	107	65
40/20/40	119	77
Bereich der CO₂-Vermeidungskosten	90 ... 120	50 ... 80