

# Regenerative Kälteerzeugung mittels indirekter Verdunstungskühlung in RLT-Anlagen

## Energieeinsparung bei der Gebäudeklimatisierung nach DIN V 18599 und EEWärmeG

Dipl.-Ing. (FH) Christian Bremer, Spartenleiter Luftbefeuchtung

### Energiepolitische Rahmenbedingungen:

Die EU-Gebäuderichtlinie EPBD zielt auf die Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden innerhalb der Europäischen Union ab, unter Berücksichtigung der jeweiligen klimatischen und lokalen Bedingungen sowie den jeweiligen Anforderungen an das Innenraumklima und der Kosteneffizienz. Dadurch werden sich zukünftig die Planungen von RLT-Anlagen im Vergleich zu heute spürbar ändern. Effizienter Gebäudekühlung

kommt dabei eine wesentliche Bedeutung zu. Nationale Umsetzungen der EPBD im Bereich der Gebäudetechnik sind in Deutschland die Energieeinsparverordnung EnEV, die DIN V 18599 zur energetischen Bewertung von Gebäuden sowie das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz EEWärmeG. Dort werden regulatorische Anforderungen an den sparsamen Umgang mit Energie im Gebäudesektor und den Einsatz erneuerbarer Energien bei der Gebäudeklimatisierung definiert.

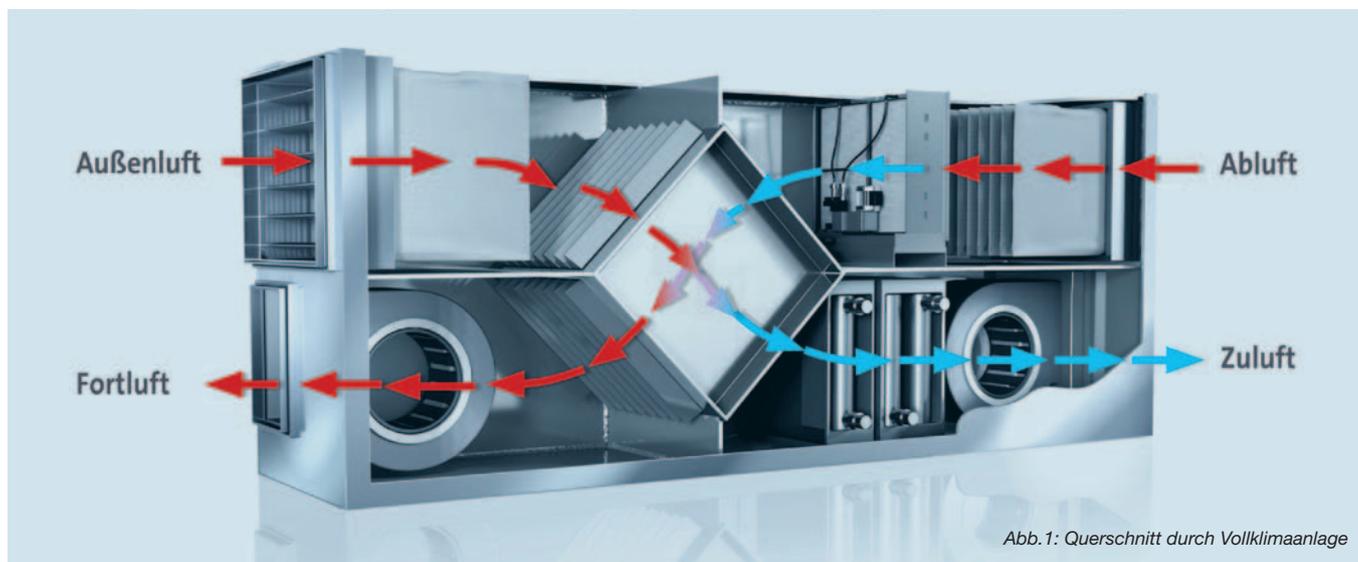


Abb. 1: Querschnitt durch Vollklimaanlage

### INDIREKTE VERDUNSTUNGS-KÜHLUNG IN RLT-ANLAGEN

Eine Möglichkeit zur Erzeugung regenerativer Kälteleistung ist die indirekte Verdunstungskühlung in RLT-Anlagen. Der Beitrag zeigt das energetische Potential dieser Effizienzmaßnahme auf. Im Jahresverlauf somit erzielbare regenerative Anteile werden mittels einer beispielhaften Simulationsrechnung auf Basis von exemplarischen Anlagenparametern und meteorologischen Standortdaten ermittelt und dargestellt.

### Prinzip der Indirekten Verdunstungskühlung

Die Reduzierung der Leistung und des Strombedarfs einer Kältemaschine für die mechanische Kälteerzeugung durch die indirekte Verdunstungskühlung beruht auf dem thermodynamischen Effekt, dass Luft abkühlt, wenn sie durch die Verdunstung von Wasser befeuchtet wird. Die für den Phasenwechsel des Wassers benötigte Verdampfungswärme wird dabei der Luft entzogen und bewirkt die erzielte Abkühlung.

### Einflussfaktoren auf den erreichbaren Kühleffekt

Bei der indirekten Verdunstungskühlung erfolgt diese Wasserverdunstung auf der Abluftseite eines RLT-Gerätes, wodurch warme Außenluft über eine nachfolgende Wärmerückgewinnung gekühlt wird. Die erzielbare Abkühlung der Außenluft ist somit von der verdunsteten Wassermenge auf der Abluftseite und der Bauart sowie dem Wirkungsgrad der eingesetzten Wärmerückgewinnung abhängig. Die Abluft kann

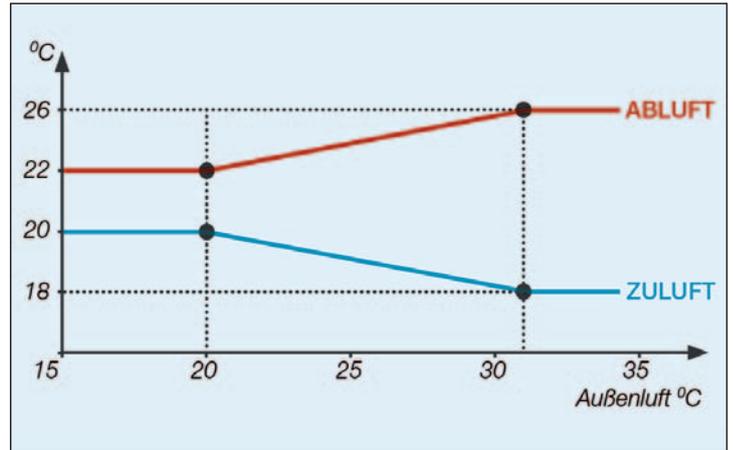
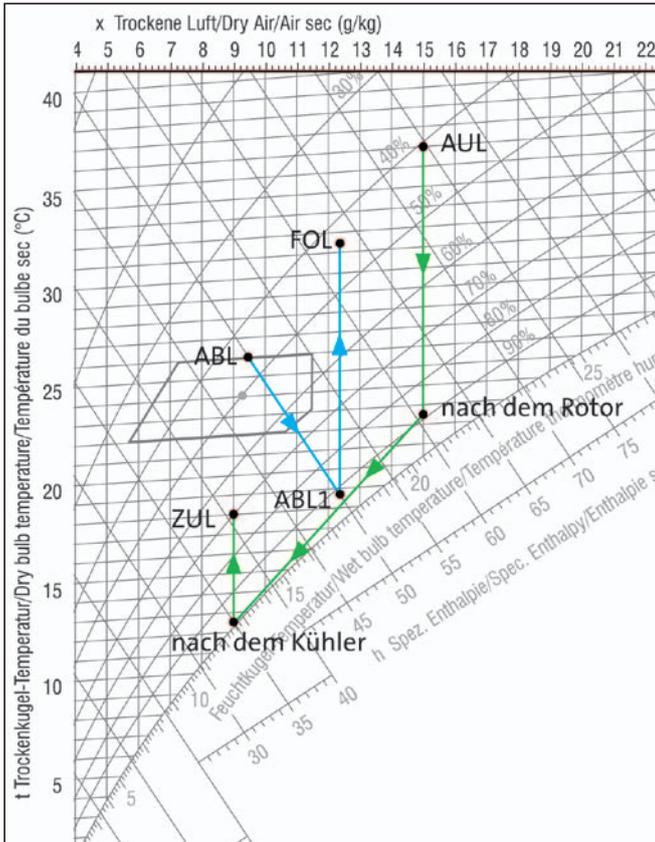


Abb.3 oben: Temperaturverlauf bei Kühlbetrieb der RLT-Anlage, welcher für die Simulationsrechnung angenommen wurde. Bei Außenlufttemperaturen von 20-32°C wird gleitender Anstieg der Ablufttemperatur von 22-26°C zugelassen. Gleichzeitig erfolgt eine ebenfalls gleitende Absenkung der Zulufttemperatur von 20-18°C zur Kompensation der ansteigenden Wärmelasten.

Abb.2 links: Schematischer Aufbau einer RLT-Anlage mit indirekter Verdunstungskühlung und qualitativer Darstellung des thermodynamischen Verlaufes bei Kühlbetrieb im h,x-Diagramm. Durch adiabate Befeuchtung der Abluft [ABL] bis kurz vor den Sättigungszustand [ABL1] wird diese um mehrere Kelvin abgekühlt. Somit kann die Abluft in der nachgeschalteten Wärmerückgewinnung der warmen Außenluft [AUL] erhebliche Wärmemengen entziehen.

dabei bis nahe der Sättigung befeuchtet werden, ohne dass ein Feuchteanstieg in der Zuluft auftritt.

Neben der Luftgeschwindigkeit, mit welcher der Verdunstungskühler durchströmt wird, hängt die verdunstete Wassermenge und somit die erreichte Abkühlung von dem Luftzustand ab, mit der die Abluft in den Verdunstungskühler eintritt. Ausschlaggebend sind dabei

- ▶ die Lufttemperatur vor der Verdunstung: Je kühler diese ist, umso weniger Feuchte kann sie aufnehmen und umso geringer wird der Abkühleffekt.
- ▶ die Luftfeuchtigkeit vor der Verdunstung: Je mehr Wasser die Luft bereits enthält, umso weniger Feuchte kann sie aufnehmen und desto geringer wird die erzielte Temperaturabsenkung.

Die theoretische Grenze der Verdunstungskühlung ist bei kompletter Sättigung der Luft mit Wasser erreicht – also bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100%. In RLT-Anlagen sind mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand Feuchteerhöhungen

auf Werte von 92 bis 95% je nach Bauart des verwendeten Verdunstungskühlers realistisch.

### ENERGIEEINSPARUNG DURCH DIE INDIREKTE VERDUNSTUNGSKÜHLUNG

Der sensible Kühlenergiebedarf eines Gebäudes wird im Wesentlichen durch die einfallende Sonnenstrahlung sowie innere Wärmelasten von Personen, Geräten und Beleuchtungsanlagen bestimmt. Für die Einhaltung der zulässigen Raumluftfeuchtigkeit wird je nach Außenluftzustand und intern vorhandenen Feuchtequellen zusätzlich latente Kühlenergie benötigt.

Die indirekte Verdunstungskühlung eignet sich für die sensible Kühlung der Zuluft. Zusätzlich für die Entfeuchtung erforderliche latente Kühlung oder über das Potential der Verdunstungskühlung hinausgehende sensible Abkühlung muss weiterhin durch einen mechanischen, aber entsprechend kleiner dimensionierten Kälteerzeuger erfolgen. Bei geeigneter Anlagenkonzeption wird durch die indirekte Verdunstungskühlung deutlich mehr elektrische Antriebs-

energie für die mechanische Kälteerzeugung eingespart als für die Überwindung des zusätzlichen luftseitigen Druckverlustes durch den Abluftventilator benötigt wird.

Wenn man bereits im Planungsstadium wissen möchte, wie viel Energie durch die indirekte Verdunstungskühlung regenerativ erbracht und tatsächlich eingespart werden kann, ist dies mittels einer Simulationsrechnung für den Betrieb der RLT-Anlage am jeweiligen Gebäudestandort zu bestimmen. In diese Simulation müssen alle im Jahresverlauf vorkommenden Außenluftkonditionen sowie die relevanten Planungsparameter der RLT-Anlage einfließen.

### Simulation einer RLT-Anlage mit indirekter Verdunstungskühlung

Der energetische Beitrag der indirekten Verdunstungskühlung soll nun anhand einer beispielhaften Simulationsrechnung für ein Mustergebäude dargestellt werden. Das heißt, es wird anhand von meteorologischen Standortdaten errechnet, wie groß die gesamte Kältearbeit zur Kühlung des Mustergebäudes tatsächlich ist und welchen Beitrag die indirekte Verdunstungs-

kühlung davon im Jahresverlauf erbringt. Die Ergebnisse können dann als realistische Grundlage für die richtige Anlagen-

## Diskussion der Simulationsergebnisse

Die Simulation veranschaulicht deutlich die im Jahresverlauf erbrachte Kühlarbeit und

Abluft durch die indirekte Verdunstungskühlung, führt das zu einer markanten Steigerung ihres energetischen Beitrages.

Die auf den Datensätzen für normale Sommer basierenden Simulationsergebnisse zeigen die bei langjährigem Anlagenbetrieb durchschnittlich zu erzielenden energetischen Beiträge, weshalb sie für die Bewertung der erzielbaren Energieeinsparung durch die indirekte Verdunstungskühlung und deren Wirtschaftlichkeit geeignet sind.

Betrachtet man die im Jahresverlauf sehr unterschiedlichen Außenluftzustände, wird schnell deutlich, dass die kältetechnischen Einrichtungen bei allen auftretenden Luftkonditionen eine angemessene Kühlleistung erbringen müssen. Deshalb sollten für die Anlagendimensionierung die auf den Extremwerten für

▶ Luftvolumenstrom des RLT-Gerätes:	52.500 m <sup>3</sup> /h
▶ Nutzungstage pro Woche:	7 d
▶ Täglicher Nutzungszeitbeginn:	6:00 h
▶ Täglicher Nutzungszeitende:	18:00 h
▶ Feuchtezunahme im Raum:	1,0 g/kg
▶ Raumlufffeuchte minimal/maximal:	40/65 % r. F.
▶ Schaltdifferenz der Verdunstungskühlung:	1,0 K
▶ Befeuchtungswirkungsgrad	94%
▶ Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung	0,75

Abb.4: Relevante Planungsparameter für Anlagensimulation

dimensionierung und die Bewertung der Wirtschaftlichkeit dieser Effizienzmaßnahme im Zuge der Anlagenplanung dienen.

deren Aufteilung auf mechanische Kälteerzeugung, indirekte Verdunstungskühlung und Wärmerückgewinnung. Die Entlas-

## Planungsparameter für das Mustergebäude

Die Simulationsrechnung wurde für den in Abb.2 dargestellten konstruktiven Aufbau des RLT-Gerätes durchgeführt, wobei die in Abb.3 dargestellten Temperaturverläufe und Parameter für den Kühlfall angenommen wurden.

Der Anlagenbetrieb erfolgt mit Sommerkompensation der Raumlufftemperatur und gleitender Absenkung der Zulufttemperatur.

Die Wärmerückgewinnung erfolgt exemplarisch mit einem Plattenwärmetauscher ohne Feuchteübertragung von der Abluft auf die Zuluftseite und ohne auftretende Leckluftströme. Das Verhältnis zwischen Zuluft- und Abluft-Volumenstrom wird mit 1:1 angenommen. Für die Anlagensimulation wurden weitere relevante Planungsparameter angenommen, Abb.4.

Die jährlich insgesamt erbrachten energetischen Beiträge ergeben sich durch Aufsummieren der für jede Stunde des Jahres durch die Simulation ermittelten Einzelergebnisse.

Die Berechnungen basieren auf statistischen Standortdaten aus der globalen meteorologischen Datenbank Meteornorm Version 6.1 für die fünf Standorte Berlin, München, Stuttgart, Wien und Bregenz.

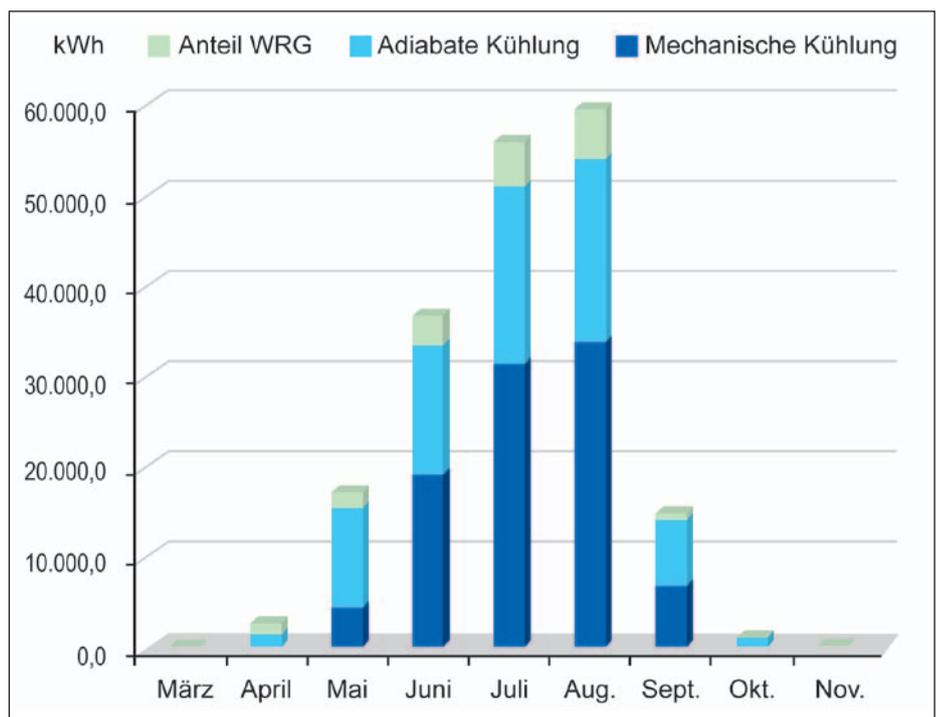


Abb.5: Grafische Darstellung der zur Gebäudekühlung monatlich erbrachten energetischen Beiträge in der beispielhaft gewählten RLT-Anlage. Zur Berechnung wurden die meteorologischen Daten von Wien (Meteornorm Version 6.1) für einen normalen Sommer verwendet. Die Anlagensimulation erfolgte mit dem Softwaretool Condair Coolblue 2.0 von Walter Meier (Klima Deutschland).

tung, welche die Wärmerückgewinnung aus der Gebäudeabluft alleine erbringt, ist, selbst bei der gewählten Rückwärmzahl von 0,75 wegen des geringen nutzbaren Temperaturunterschiedes bei Kühlbetrieb, entsprechend gering. Erfolgt jedoch die zusätzliche Temperaturabsenkung der

warme Sommer basierenden Simulationsergebnisse herangezogen werden. Wenn zudem noch zukünftige Klimaentwicklungen berücksichtigt werden sollen, können Modellsimulationen mit meteorologischen Zukunfts-Datensätzen vorgenommen werden – sofern deren

ausreichende Repräsentativität vorausgesetzt wird. Wie die Simulation zeigt, führt die indirekte Verdunstungskühlung zu beachtlichen regenerativen Beiträgen. Dabei ergeben sich bei ansonsten gleicher Anlagenauslegung deutliche Unterschiede aus den jeweiligen Witterungsdaten der gewählten Standorte.

Bei regional höheren Außenluftfeuchten, wenn also auch mehr entfeuchtet werden muss, weist ihr energetischer Beitrag geringere anteilige Werte auf. Dies zeigt sich deutlich in Bregenz, das durch die direkte Lage am Ostufer des Bodensees entsprechend klimatisch beeinflusst wird.

Der gesamte regenerative Anteil ergibt sich jeweils aus der Summe der energetischen Beiträge von indirekter Verdunstungsküh-

lung und Wärmerückgewinnung. Dieser erreicht an den ausgewählten Gebäudestandorten zwischen 40 und 56,6% der insgesamt jährlich zu erbringenden Kühlenergie.

**DIE FRAGE NACH DER WIRTSCHAFTLICHKEIT**

Die größte Hürde beim Einsatz erneuerbarer Energien stellt in der Praxis die Wirtschaftlichkeit dar. Effizienzmaßnahmen wie die indirekte Verdunstungskühlung müssen sich rechnen. Entstehende Mehrkosten bei den Investitionen müssen durch die erzielten Einsparungen beim Betrieb wieder eingeholt werden. Diese Bilanzierung muss dabei für das jeweilige Gebäude erfolgen. Eine verlässliche Anlagensimulation macht

die Zusammenhänge transparent und ermöglicht den realistischen Vergleich mit konventionellen Maßnahmen zur Gebäudekühlung.

**FAZIT**

Anhand der vorgenommenen Beispielrechnungen dürfte klar nachgewiesen worden sein, dass der energetische Nutzen der Verdunstungskühlung unumstritten ist. Ihr energetischer Gewinn hängt von dem zu klimatisierenden Gebäude, der Auslegung der RLT-Anlage und dem jeweiligen Gebäudestandort ab.

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Einfluss der Anlagenparameter und der jeweiligen meteorologischen Standortdaten auf die erzielbaren energetischen Beiträge und die angemessene Dimensionierung der Anlagenkomponenten. Eine statische Ermittlung des Kühlleistungsbedarfes bei standardisierten Außenluftkonditionen trägt diesem Umstand nur ungenügend Rechnung.

Eine realistische Bewertung von erforderlicher Kühlleistung und im Jahresverlauf erbrachter Kühlarbeit ist im Planungsstadium nur anhand einer dynamischen Anlagensimulation möglich. Auf meteorologischen Datensätzen für normale Sommer basierende Simulationsrechnungen liefern Mittelwerte und bilden die Grundlage für die Bewertungen belastbarer Energieeinsparungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.

Simulationsergebnisse auf Basis von Extremwert-Datensätzen für warme Sommer ermöglichen dagegen die angemessene Dimensionierung der erforderlichen Anlagenkomponenten. Somit wird auch dem höheren Kühlbedarf bei überdurchschnittlich warmen sommerlichen Verläufen, welche in der klimatischen Realität durchaus auftreten, ausreichend Rechnung getragen.

*Autor*

*Dipl.-Ing. (FH) Christian Bremer  
Spartenleiter Luftbefeuchtung  
Walter Meier (Klima Deutschland)  
Garching-Hochbrück/München  
Grafiken: Walter Meier  
(Klima Deutschland), Axair  
[www.waltermeier.com](http://www.waltermeier.com)*

**Tabelle : Simulationsergebnisse für das Mustergebäude**

Standort		Berlin	München	Stuttgart	Wien	Bregenz
$Q_{K(32^{\circ}C, 40\% r.F.)}$	kW	321				
Betriebsstunden	h/a	912	758	1.127	1.213	727
$Q_{K, ges}^*$	kW	560	371	486	598	538
$Q_{K, mechanisch}^*$	kW	351	269	289	416	364
$Q_{K, Verdunst. + WRG}^*$	kW	209	102	197	182	174
$W_{K, ges}$	kWh/a	120.098	93.628	154.993	184.584	111.707
$W_{K, mechanisch}$	kWh/a	53.887	44.849	67.192	96.235	66.994
$W_{K, Verdunst.}$	kWh/a	56.479	42.871	72.132	72.873	38.741
$W_{K, WRG}$	kWh/a	9.733	5.909	15.669	15.477	5.972
$\square_{Reg}$	%	55,1	52,1	56,6	47,9	40,0

\* Extremwert-Simulation für warme Sommer

Die Simulationsergebnisse beziehen sich auf die beispielhafte RLT-Anlage an 5 ausgewählten Standorten. Der energetische Beitrag der indirekten Verdunstungskühlung verringert die vom mechanischen Kälteerzeuger zur Gebäudekühlung zu erbringende Kälteleistung erheblich.

▶ $Q_{K(32^{\circ}C, 40\% r.F.)}$	Gesamt-Kälteleistung bei Standard-Außenluftbedingungen
▶ $Q_{K, ges}^*$	Gesamt-Kälteleistung (Extremwert)
▶ $Q_{K, mechanisch}^*$	Mechanische Kälteleistung (Extremwert)
▶ $Q_{K, Verdunst. + WRG}^*$	Regenerative Kälteleistung (Extremwert)
▶ $W_{K, ges}$	Gesamte, jährlich erbrachte Kühlenergie (Mittelwert)
▶ $W_{K, mechanisch}$	Energetischer Anteil der mechanischen Kälteerzeugung (Mittelwert)
▶ $W_{K, Verdunst.}$	Energetischer Anteil der indirekten Verdunstungskühlung (Mittelwert)
▶ $W_{K, WRG}$	Energetischer Beitrag der Wärmerückgewinnung (Mittelwert)
▶ $\square_{Reg}$	Regenerativer Anteil (Mittelwert)