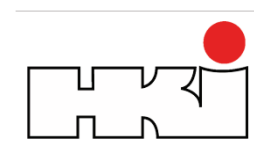


# Küche und Technik

Handbuch für gewerbliche Küchen - Teil II (1.0/2020)



Mit freundlicher Unterstützung durch den  
HKI Industrieverband  
Haus-, Heiz- und Küchentechnik e.V.  
Frankfurt am Main





## Küche und Technik - Handbuch für gewerbliche Küchen. Teil II (1.0/2020)

### Autorenteam

<i>Michael Greiner</i>	Professor für Haushaltstechnik, Catering & Systemgastro- nomie, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
<i>Stephanie Hagspihl</i>	Professorin für Catering - Food Supply, Hochschule Fulda
<i>Astrid Klingshirn</i>	Professorin für Lebensmitteltechnologie, Hochschule Albstadt-Sigmaringen
<i>Elmar Schlich</i>	Professor für Prozesstechnik in Lebensmittel- und Dienst- leistungsbetrieben, Justus-Liebig-Universität Gießen
<i>Peter Schwarz</i>	Professor für Großküchentechnik, Hochschule Albstadt-Sig- maringen
<i>Sascha Skorupka</i>	Professor für Physik und Technik, Hochschule Fulda

### Koordination und Redaktion

<i>Michael Greiner</i>	Koordination des Arbeitskreises „Gewerbliche Küchen“ im Fachausschuss Haushaltstechnik, Text- und Bildredaktion des vorliegenden Handbuchs sowie Lizenzverhandlungen
<i>Elmar Schlich</i>	Endredaktion und Online-Layout

### Urheberrechtliche Hinweise und Bildnachweise

Die Urheberrechte aller Texte und Abbildungen liegen bei den jeweils angegebenen Autoren/innen der Kapitel sowie beim Fachausschuss Haushaltstechnik in der Deutschen Gesellschaft für Hauswirtschaft e. V. (dgh) als Herausgeber.

Mehrere hier genutzte Fotos sind der Plattform <<https://pixabay.com>> entnommen. Die jeweiligen Urheber sind unter dem Foto genannt.

Deckblattfotos: Energie ©Braxmeier; Verbrennung ©Magnascan; Kältetechnik ©Jennifer Herrera; Trinkwasser ©Charles Rondeau; Belüftung ©AFPmark; Beleuchtung ©David Mark - alle auf pixabay.

Alle weiteren Abbildungen mit freundlicher Genehmigung des Bundeszentrums für Ernährung (BZfE), sofern unter der Abbildung selbst nichts anderes angegeben ist. Der Herausgeber und das Autorenteam danken allen genannten Quellen für die freundliche und unentgeltliche Unterstützung.

#### Impressum

Fachausschuss Haushaltstechnik  
Deutsche Gesellschaft für Hauswirtschaft  
Hafenstraße 9  
48432 Rheine  
Tel.: +49 (0) 5971 8007398  
Mail: [dgh@dghev.de](mailto:dgh@dghev.de)





## Küche und Technik - Handbuch für gewerbliche Küchen. Teil II (1.0/2020)

**Inhalt**

<b>2</b>	<b>Physikalisch-technische Grundlagen</b>		<b>Seite</b>
2.1	Energie	<i>Elmar Schlich</i>	7
2.2	Grundlagen der Verbrennung	<i>Elmar Schlich</i>	33
2.3	Grundlagen der Kältetechnik	<i>Elmar Schlich und Astrid Klingshirn</i>	41
2.4	Trinkwasser	<i>Stephanie Hagspihl</i>	59
2.5	Lüftung	<i>Peter Schwarz und Michael Greiner</i>	67
2.6	Beleuchtung	<i>Sascha Skorupka</i>	79

Redaktioneller Hinweis: Die gesamte Datei ist für den beidseitigen Druck auf Vor- und Rückseite formatiert. Daher beginnen die Kapitel jeweils auf einer ungeraden Seite.

**Zitation**

Greiner M, Hagspihl S, Klingshirn A, Schlich E, Schwarz P, Skorupka S (2020): Küche und Technik - Handbuch für gewerbliche Küchen. Teil II (1.0/2020). Fachausschuss Haushaltstechnik in der Deutschen Gesellschaft für Hauswirtschaft e.V. (Hrsg.). In: Hauswirtschaft und Wissenschaft 68 (2020), ISSN online 2626-0913. <https://haushalt-wissenschaft.de> DOI: 10.23782/HUW\_14\_2020



## Kapitel 2 Physikalisch-technische Grundlagen

### 2.1 Energie

#### **Elmar Schlich<sup>1</sup>**

Bei vielen Entscheidungen und Anwendungen in der gewerblichen Küche helfen technische, wirtschaftliche und ökologische Kenntnisse rund um Energie weiter: Welcher Energieträger ist technisch ideal für die jeweilige Anwendung geeignet? Wie können Energiekosten in der gewerblichen Küche gesenkt werden? Welche Umweltwirkungen haben verschiedene Energieträger? Energieverbrauchswerte stellen notwendige Basisdaten für Kostenrechnung und Ökobilanzen in der Individual- und Gemeinschaftsgastronomie dar. Zur fachlich richtigen Beantwortung dieser Fragen sind die Kenntnis und das Verständnis von Grundbegriffen der Energiewirtschaft und der Thermodynamik von Vorteil.

#### **Grundbegriffe der Energiewirtschaft**

Die Energiewirtschaft unterscheidet zwischen Primärenergie (PE), Endenergie (EE) und Nutzenergie (NE). Träger von Primärenergie sind z. B. Stein- und Braunkohle, Kernbrennstoffe, Erdöl (Rohöl), Erdgas (Rohgas), Brennstoffe aller Art wie z. B. Holz und andere Biomasse sowie weitere regenerative Energieträger wie Solarenergie und Windkraft.

Energieversorgungsunternehmen (EVU) wandeln Primärenergie in Endenergie (früher auch Sekundärenergie genannt) um und leiten diese über Verteilnetze an ihre Endkunden weiter (siehe Abb. 2.1). Die Umwandlung geschieht in technischen Anlagen wie z. B. Kraftwerken, Raffinerien, Biogasanlagen, Heizkraftwerken, Windgeneratoren oder Photovoltaikanlagen. Träger von Endenergie sind z. B. Elektroenergie, Treibstoffe, Heizöl, Nah- und Fernwärme, Erdgas und Biogas.

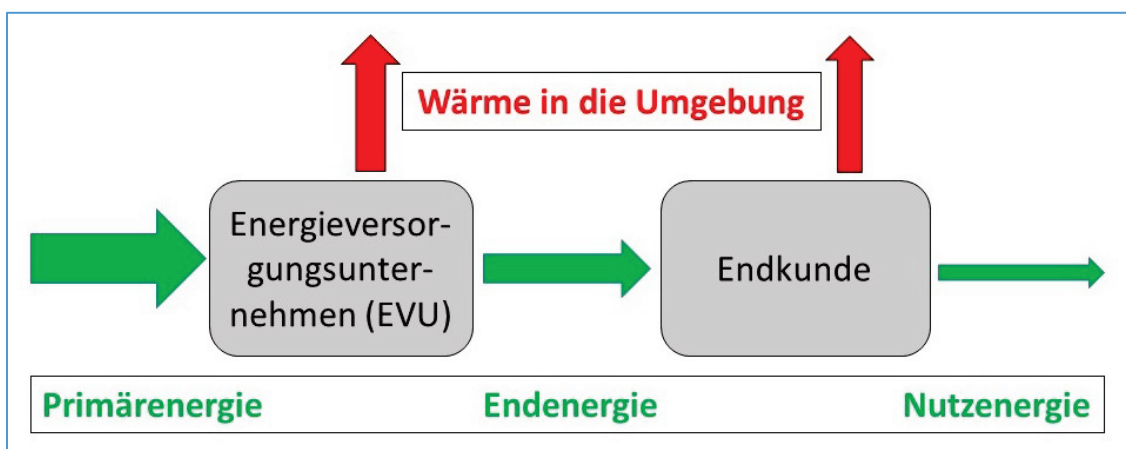


Abb. 2.1: Flussdiagramm der Energiewirtschaft mit Primär-, End- und Nutzenergie (© E. Schlich)

<sup>1</sup> Prof. i.R. Dr.-Ing. Elmar Schlich, Justus-Liebig-Universität Gießen, Professur für Prozesstechnik in Lebensmittel- und Dienstleistungsbetrieben <elmar.schlich@ernaehrung.uni-giessen.de>.

Die EVU verkaufen die erzeugte Endenergie an ihre Endkunden, z. B. an Verkehrsbetriebe, private und gewerbliche Haushalte, Gastronomie, Handwerk, Dienstleistungs- und Industriebetriebe. Erst beim Endkunden wird Endenergie vor Ort in Nutzenergie umgewandelt.

Endenergie steht in der Regel in Deutschland am Ort und zur Zeit der vom Endkunden gewünschten Nutzung (= Umwandlung in Nutzenergie) zur Verfügung. Dabei ist zwischen leitungsgebundenen (Elektroenergie, Erdgas, Nah- und Fernwärme) und nicht leitungsgebundenen Endenergieträgern (Brennstoffe, Treibstoffe) zu unterscheiden. Entsprechend unterscheiden sich auch die ökonomischen Randbedingungen, da alle nicht leitungsgebundenen Endenergieträger bevorratet werden müssen. Die Speicherung der leitungsgebundenen Elektroenergie per Akkumulator ist zwar technisch möglich, aber sehr aufwändig und allenfalls bei eigener Stromerzeugung per Photovoltaik sinnvoll. Erdgas, Nah- oder Fernwärme können nicht beim Endkunden gespeichert werden.

Das Ziel der Umwandlung von Endenergie beim Endkunden besteht in der Bereitstellung von Arbeit und/oder Wärme (Näheres zu diesen Begriffen: siehe unten) für alle gewünschten Anwendungen.

Die jeweiligen Umwandlungen von Primär- in Endenergie und von End- in Nutzenergie laufen aus thermodynamischen Gründen niemals verlustfrei ab. Ein nicht unbeträchtlicher Teil geht jeweils als (Ab-)Wärme auf niedrigem Temperaturniveau in die Umgebung (siehe Flussdiagramm in Abb. 2.1). So erzeugt ein großes Steinkohlekraftwerk etwa 40 - 45 % Endenergie in Form von Elektroenergie aus 100 % Primärenergie, z. B. aus Steinkohle, während ein regionales Heizkraftwerk (HKW) bis zu 90 % Endenergie in Form von Elektroenergie und Fernwärme aus Erd- oder Biogas bereitstellen kann. Denn ein HKW speist die bei der Verbrennung von Erd- oder Biogas entstehende Abwärme als Fernwärme in die Heizkreisläufe von Wohn- und Industriegebieten ein und nutzt diese zusätzlich.

### **Grundbegriffe der Physik**

Wenn es heißt, „Ein Küchengerät braucht Energie“, ist zumeist gemeint, dass das Gerät Endenergie in Form von Elektroenergie, Erdgas oder Heißdampf benötigt. Doch der physikalische Begriff der Energie ist erheblich strenger gefasst. Ganz grundsätzlich beschreibt Energie eine Eigenschaft von Materie und von elektromagnetischen Feldern. Den physikalischen Hintergrund hierzu liefern die Relativitätstheorie und die Quantenelektrodynamik. Diese fundamentalen Theorien sind von grundlegender Bedeutung für heute in allen Lebensbereichen zu findende technische Anwendungen wie z. B. Mobiltelefone, globale Satellitenortung (GPS), Computertechnik, Datenspeicherung und Internet, die selbstverständlich auch in gewerblichen Küchen genutzt werden.

Für die Anwendungstechnik in gewerblichen Küchen sind die Begriffe und Definitionen aus der klassischen Thermodynamik interessanter. Die Thermodynamik, früher auch Wärmelehre genannt, ist das Teilgebiet der Physik, das sich mit der anwendungstechnischen Umwandlung von Energie befasst.

Grundsätzlich unterscheidet die Thermodynamik Energie nach ihrer Wertigkeit in Exergie<sup>2</sup> und Anergie<sup>3</sup>. Exergie meint dabei lediglich den arbeitsfähigen Anteil der Energie, während Anergie den nicht arbeitsfähigen Anteil der Energie darstellt. Zum besseren Verständnis dieser Definitionen gehören die Begriffe aus der thermodynamischen Systemtheorie. Danach sind zu unterscheiden:

- das abgeschlossene System, über dessen Systemgrenze weder Masse- noch Energie ausgetauscht werden können;
- das geschlossene System, dessen Systemgrenze nur Energietransport erlaubt und
- das offene System, über dessen Systemgrenze sowohl Energie- als auch Massetransport möglich sind.

Masse und Energie sind in der klassischen Physik sogenannte **Erhaltungsgrößen**, die zeitlich bilanziert werden können, vergleichbar mit der Buchhaltung in der Finanzwelt. Für das abgeschlossene System als rein theoretisches Modell gilt, dass die Summe der Energie konstant bleibt, wobei lediglich Umwandlungen von einer in die andere Energieform möglich sind<sup>4</sup> (siehe Abb. 2.2). Dabei verändern sich die thermodynamischen **Zustandsgrößen** Temperatur, Druck und Volumen im System als Funktion der Zeit.

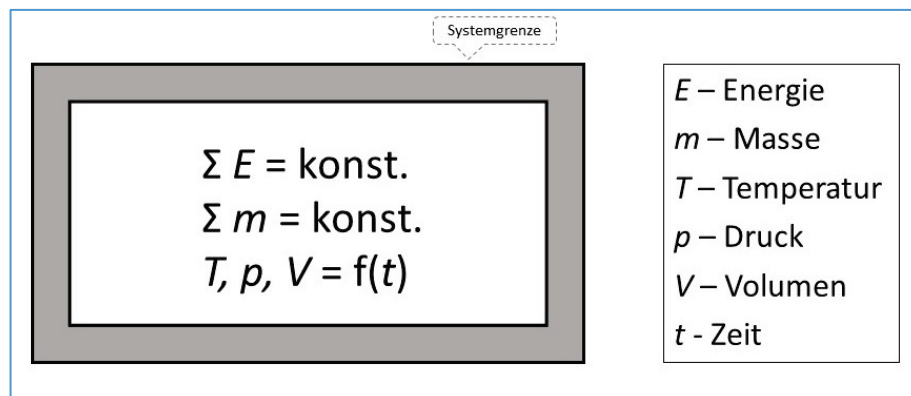


Abb. 2.2: Abgeschlossenes System mit Erhaltungs- und Zustandsgrößen (© E. Schlich)

Für alle Geräte und Anwendungen in gewerblichen Küchen stellt das offene System die allgemeinste Form der thermodynamischen Modellbildung dar. Mit Hilfe der Energie- und Massebilanzen ist es möglich, die zeitlichen Änderungen von Temperatur, Druck und Volumen im System vorzuberechnen und/oder zu messen.

<sup>2</sup> Exergie (aus dem Griechischen): Ex - außen; Ergeia - Arbeit.

<sup>3</sup> Anergie (aus dem Griechischen): An - ohne; Ergeia - Arbeit.

<sup>4</sup> Dies gilt streng genommen nur, wenn keine kernphysikalischen Prozesse stattfinden, was in gewerblichen Küchen wohl - hoffentlich - der Fall sein dürfte.

Am Beispiel der Produktion von Brötchen in einem Backautomaten zeigt sich, welche Masse- und Energieströme als In- und Output auftreten (Abb. 2.3).

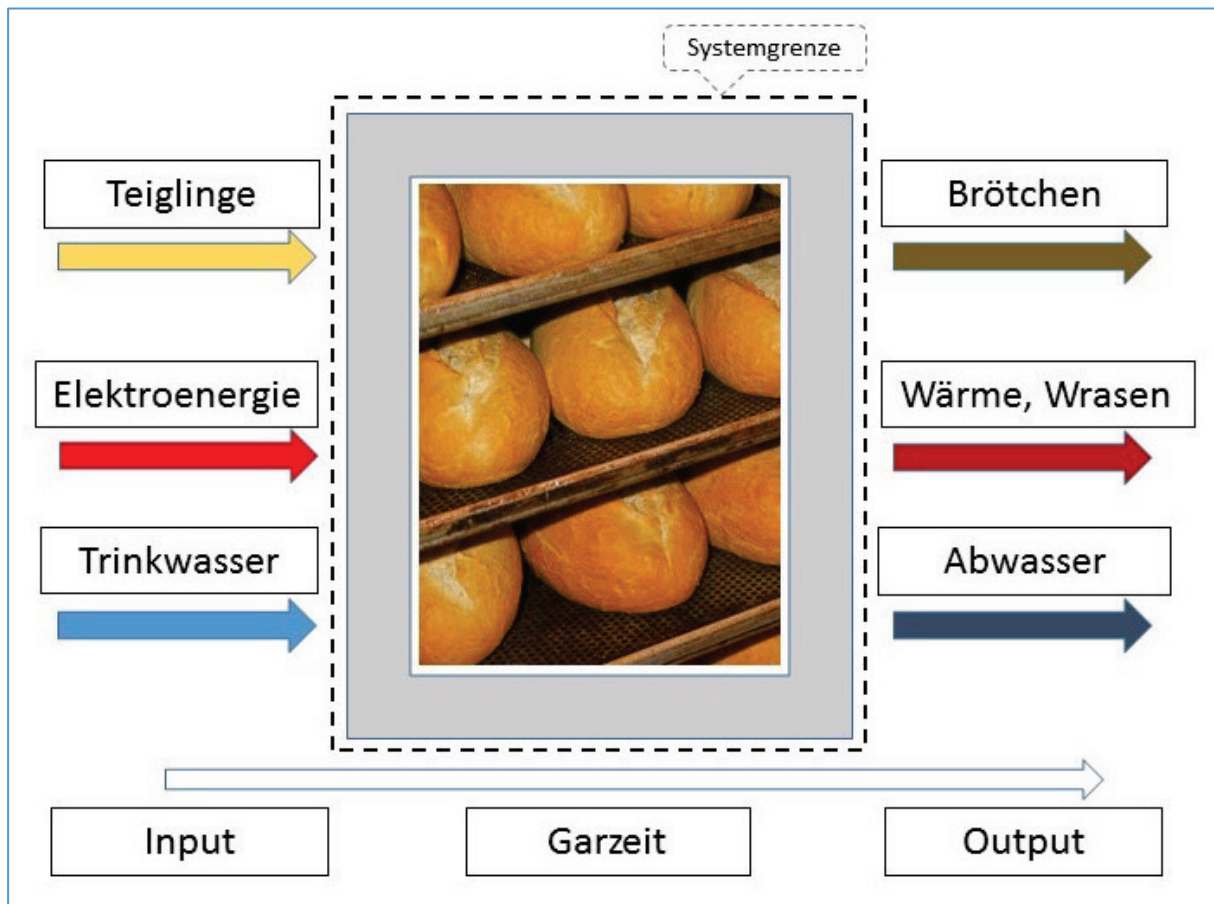


Abb. 2.3: Offenes System mit In- und Output - Beispiel Backautomat (Foto: K. Riemer; © E. Schlich)

Alle technischen Anlagen und Geräte sind in der Regel als offene Systeme zu verstehen, da diese permanent mit der Umgebung im Energie- und Stoffaustausch stehen. Zur Bilanzierung stehen instationäre<sup>5</sup> Energie- und Massebilanzen zur Verfügung, mit denen die ablaufenden Prozesse modelliert werden können (Gl. 1, 2). In der allgemeinsten Form lauten diese:

$$\frac{dE_S}{dt} = \dot{E}_{\text{Input}} - \dot{E}_{\text{Output}} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\frac{dm_S}{dt} = \dot{m}_{\text{Input}} - \dot{m}_{\text{Output}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Erläuterung:

$E_S$  = Energie des Systems,

$m_S$  = Masse des Systems und

$dt$  = Differential über die Zeit.

Der hoch gesetzte Punkt charakterisiert in der Mathematik zeitabhängige Größen, hier sind also Energie und Masse pro Zeiteinheit gemeint.

<sup>5</sup> Instationär: zeitabhängig - die Bilanzen liegen dann als Differentialgleichung über die Zeit vor.



## Energetische Größen und Einheiten

Physikalische Größen sind immer gemeinsam mit Zahlenwert und Einheiten anzugeben. Umgangssprachliche Verkürzungen (Beispiel: Kilo statt Kilogramm) oder die Verwechslung von Größe und Einheit (Beispiel: Wattzahl statt Leistung) sind nicht zulässig. Veraltete Einheiten sind nur in Ausnahmefällen erlaubt, und dann auch nur, wenn die SI-Einheit zuerst genannt wird.<sup>6</sup> Dies ist in Deutschland im „Gesetz über die Einheiten im Messwesen und die Zeitbestimmung“ vom 2. Juli 1969 mit der jüngsten Änderung vom 08. September 2015 geregelt. Zusätzlich schreiben die Richtlinie 80/181/EWG und die deutsche Einheitenverordnung SI-Einheiten<sup>7</sup> als gesetzliche Einheiten vor. Somit dürfen im geschäftlichen Verkehr lediglich die dort genannten Größen und Einheiten verwendet werden.

Zur Unterscheidung von Größen und Einheiten ist zudem festgelegt, dass Größen *kursiv* und Einheiten nicht kursiv geschrieben werden. So kann derselbe Buchstabe ohne die Gefahr der Verwechslung zweifach genutzt werden, wie z. B. *m* für die Masse und *m* für das Meter als Einheit der Länge.

Energie als physikalische Größe nutzt den Buchstaben **E** mit der Einheit J (Joule). Dies ist - sozusagen - die übergeordnete Größe. Ein Joule ist definiert über:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m} = 1 \text{ kg} \times 1 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \quad (\text{Gl. 3})$$

Jede Größe kann wie in Gl. 3 gezeigt auf die sogenannten SI-Basisgrößen zurückgeführt werden (hier Kilogramm, Meter und Sekunde). Größen, die durch den Faktor 1 mit den Basisgrößen verknüpft sind, heißen auch *kohärente* Größen. Für die Anwendungstechnik in der Küche sind vor allem die Größen der Energieübertragung sowie die systembeschreibenden energetischen Größen wichtig.

## Übertragungsgrößen Arbeit und Wärme

In gewerblichen Küchen sind alle Prozesse darauf angewiesen, dass Energie übertragen wird. Dies gilt für Garverfahren, Spülen und Waschen ebenso wie für Kühlen und Gefrieren. Immer muss den entsprechenden Anlagen und Geräten Energie zu- und/oder abgeführt werden. Aus thermodynamischer Sicht können zur Übertragung von Energie über die Systemgrenze ausschließlich die physikalischen Größen **Arbeit** und **Wärme** genutzt werden, selbstverständlich auch gleichzeitig. Die gleichzeitige Übertragung von Arbeit und Wärme in ein Garsystem ist z. B. in einem beheizten und mit einem Rührer ausgestatteten Brotbackautomaten zu finden. Dabei ist die Arbeit *W* als das Vektorprodukt aus Kraft *F* und Weg *s* definiert (Gl. 4):

$$W = F \times s \quad (\text{Gl. 4})$$

<sup>6</sup> Bei der Kennzeichnung von Lebensmitteln muss die Energie laut EU-VO in kJ angegeben werden. Die Angabe der Energie in der seit 1948 veralteten Einheit kcal ist lediglich zusätzlich erlaubt.

<sup>7</sup> SI: Système international d'unités, auch: Internationales Einheitensystem.

## Wärme

Eine zentrale Größe zur Übertragung von Energie an ein System ist die Wärme. Dabei unterscheidet die Thermodynamik deutlich zwischen den Begriffen „**Wärme**“ und „**Thermische Energie**“ (Thermische Energie: siehe Seite 18).

Wärme ist eine gerichtete Größe und meint thermodynamisch immer die Übertragung von Energie von einem auf ein anderes System. Dabei fließt Wärme thermodynamisch zwangsläufig vom Ort der höheren zum Ort der niedrigeren Temperatur. Daraus ergibt sich auch der Umkehrschluss: Wärme fließt niemals **von selbst** vom Ort der niederen zum Ort der höheren Temperatur. Systeme derselben Temperatur sind thermisch ausgeglichen.

In der Anwendungstechnik ist in diesem Zusammenhang auch häufig von **Kälte** die Rede. Dies ist jedoch kein thermodynamischer Begriff. Vielmehr geht es hier um Kühlung (bei +7 bis +0,5 °C) und Gefrierlagerung von Lebensmitteln (bei -12 bis -18 °C) sowie um Klimatechnik (bei +20 bis +25 °C), jeweils durch die Abfuhr von Wärme aus dem System. Das Thema **Grundlagen der Kältetechnik** wird in Kapitel 2.3 des vorliegenden Handbuchs behandelt.

Für die **Wärmeübertragung** gibt es drei unterschiedliche Mechanismen:

- Wärmeleitung (auch Konduktion genannt);
- Konvektion (auch Wärmeübergang genannt) und
- Wärmestrahlung (auch Infrarotstrahlung oder IR-Strahlung genannt).

Alle diese Mechanismen können in der Anwendungstechnik für sich allein oder auch gleichzeitig auftreten. Bei der Kombination von Wärmeleitung und Konvektion wird in der Technik von Wärmedurchgang gesprochen.

### Wärmeleitung (Konduktion)

Wärmeleitung findet vorwiegend in festen Körpern statt. Die Energie wird dabei durch die Übertragung der thermischen Molekularbewegung von Molekül zu Molekül weitergegeben. Damit gleichen sich unterschiedliche Temperaturen  $T$  aus, abhängig von der treibenden Temperaturdifferenz  $\Delta T$  mit  $T_2 > T_1$ , der Schichtdicke  $s$ , der Fläche senkrecht zum Wärmedurchgang  $A$  und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des festen Körpers als Stoffeigenschaft.

Tab. 2.1: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Werkstoffe (Auswahl, orientierende Werte)

Werkstoff	$\lambda$ in W/(m · K)	Werkstoff	$\lambda$ in W/(m · K)
Baustahl (St 37)	50	Aluminium (Legierung)	220
Edelstahl (1.4301)	15	Glas	0,75
Kupfer (Legierung)	350	Polystyrol	0,03

Wie Tab. 2.1 zeigt, unterscheiden sich verschiedene Werkstoffe deutlich in ihrer Wärmeleitfähigkeit. Ein gutes Beispiel für die technische Anwendung von Wärmeleitung findet sich in Gargefäßen, deren Boden als Sandwich- oder Kapselboden ausgestaltet ist. Hier bestehen die äußeren Schichten aus korrosionsfestem Edelstahl, während im Topfboden zusätzlich eine Aluminium- oder Kupferschicht eingearbeitet ist, die zur Verbesserung der Wärmeübertragung vom Gargerät (Elektrokochfeld, Gasbrenner) an das Gargut im Gargefäß dient. Diese Zwischenschicht gleicht auch radial unterschiedliche Temperaturen aus, um sogenannte „hot spots“ der Überhitzung in Boden und im Gargut zu vermeiden.

Das Prinzip der Wärmeleitfähigkeit in festen Körpern veranschaulicht Abb. 2.4, unter Angabe der Berechnungsgleichung der Wärmeleitung in Gl. 5.

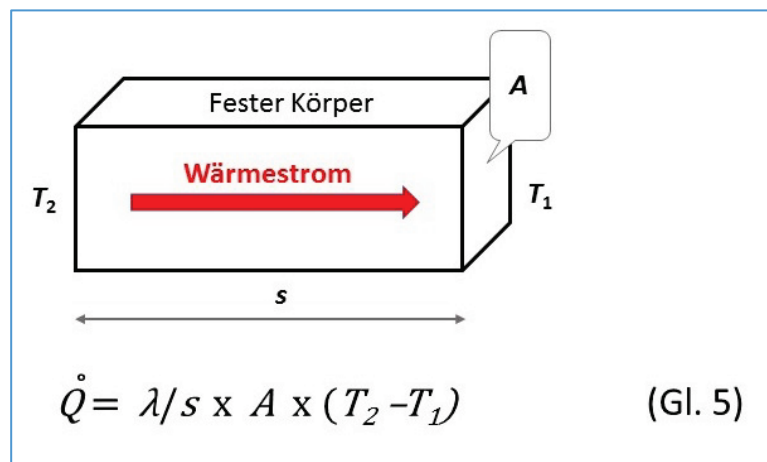


Abb. 2.4: Prinzipbild der Wärmeleitung im festen Körper (© E. Schlich)

### Konvektion (Wärmeübergang)

Bei Konvektion als wichtiger Mechanismus der Wärmeübertragung spielt immer ein Stofftransport über Fluide (= Flüssigkeiten und Gase) die zentrale Rolle. Dieser Mechanismus wird auch als gekoppelter Energie- und Stofftransport bezeichnet. Hierbei sind zwei Arten zu unterscheiden, die natürliche und die erzwungene Konvektion.

Die **natürliche Konvektion** beruht darauf, dass Fluide höherer Temperatur sich ausdehnen, somit eine geringere Dichte aufweisen und deshalb aufsteigen. Dieses Phänomen ist in der Meteorologie als Thermik bekannt. Ein gutes Anwendungsbeispiel sind Konvektionsheizkörper zur Beheizung von Räumen. Die erwärmte Raumluft strömt nach oben, so dass im unteren Bereich kältere Luft nachfließt. So ergibt sich ein natürlicher Kreislauf, verursacht durch die geringere Dichte der erwärmten Raumluft (siehe Abb. 2.5).

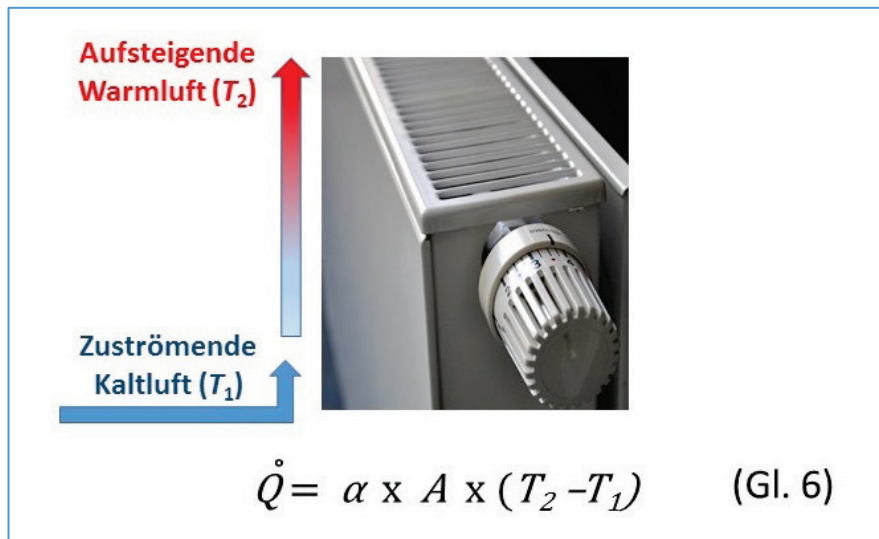


Abb. 2.5: Prinzipbild der natürlichen Konvektion (Foto: ri auf pixabay; © E. Schlich)

Die zugehörige Gleichung (Gl. 6) ist formal ähnlich aufgebaut wie die Gleichung zur Wärmeleitung (Gl. 5), hier mit dem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$ . So kann der an den Stofftransport gekoppelte Wärmestrom (übertragene Wärme per Zeiteinheit) berechnet werden. Der Wärmeübergangskoeffizient steigt mit der Strömungsgeschwindigkeit des Fluids deutlich an (siehe Tab. 2.2).

Tab. 2.2: Übersicht zu typischen Wärmeübergangskoeffizienten

Fluid	$\alpha$ (W/(m <sup>2</sup> · K))	Fluid	$\alpha$ (W/(m <sup>2</sup> · K))
ruhende Luft im Innenraum	5 - 8	Wasser in Behältern (natürliche Konvektion)	500 - 2.000
mäßig bewegte Luft (natürliche Konvektion)	20 - 70	Wasser in Rohrleitungen (erzwungene Konvektion)	2.000 - 5000
stark bewegte Luft (erzwungene Konvektion)	70 - 300	Kondensierender Wasserdampf	6.000 - 12.000

Die **erzwungene Konvektion** unterscheidet sich von der natürlichen Konvektion lediglich dadurch, dass bei gasförmigen Fluiden ein Gebläse bzw. bei Flüssigkeiten eine Pumpe den Stofftransport und damit den gekoppelten Energietransport maßgeblich unterstützt. Auf diese Weise werden beträchtliche Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  erreicht (siehe Tab. 2.2). Dies machen sich Heißluft- bzw. Umluftbacköfen in der Küche zunutze: Der Wärmeeintrag in das Gargut ist so hoch, dass die Backtemperatur um ca. 10 - 15 % abgesenkt werden muss, um die Überhitzung des Garguts zu vermeiden. So würde für einen Backvorgang im Heißluftbetrieb eine Ofenraumtemperatur von z. B. 160 °C statt 180 °C bei Ober- und Unterhitze ausreichen, so dass erheblich weniger Endenergie erforderlich ist.

Der Begriff der Konvektion ist im Übrigen namensgebend für Konvektomaten, die unter diesem Namen in gewerblichen Küchen zu finden sind. Diese Geräte arbeiten mit Heißluft konstanter Temperatur, die im Garraum von einem Gebläse umgewälzt wird. Umgangssprachlich werden gelegentlich auch Heißluftdämpfer, die zusätzlich zu Heißluft mit Wasserdampf arbeiten, als Konvektomaten bezeichnet.



Abb. 2.6: Heißluftbackofen mit Brötchen auf zwei Ebenen (© H. Braxmeier auf pixabay)

Durch die erzwungene Konvektion sind hohe Energieübertragungsraten bei kurzen Aufheiz- und Garzeiten möglich. Hinzu kommt, dass gleichzeitig auf mehreren Ebenen gearbeitet werden kann, so dass große Mengen an verzehrsfertigen Lebensmitteln gleichzeitig produziert werden können (Abb. 2.6).

Auf die Verwendung von Wasserdampf sowie die Kombination von Heißluft und Wasserdampf als konvektive Energieträger in solchen Geräten und den zugehörigen physikalischen Hintergrund wird weiter unten eingegangen (siehe dazu die Stichworte: Verdampfung und Kondensation).

### **Wärmestrahlung (Infrarote Strahlung)**

Wärmestrahlung ist elektromagnetische Strahlung im infraroten Bereich (IR-Strahlung). Der Energietransport ist hier nicht an Materie gebunden, sondern kann auch im Vakuum stattfinden. IR-Strahlung ist langwelliger als sichtbares Licht und daher für den Menschen nicht sichtbar. Ein Körper höherer Temperatur emittiert mehr IR-Strahlung. Diese kann von Körpern niedrigerer Temperatur reflektiert (Reflexion), mehr oder weniger vollständig absorbiert (Absorption) oder durchgelassen werden (Transmission).

Die Wellenlänge der IR-Strahlung hängt von der Temperatur des strahlenden Körpers ab. Anwendungstechnisch interessant sind Wellenlängen im mittleren Infrarot (MIR) von 3 - 50  $\mu\text{m}$ . Dem entsprechen Temperaturen von 600 - 800 °C, wobei der strahlende Körper auch sichtbares Licht emittiert (siehe Abb. 2.7).





Abb. 2.7: IR-Strahlung (nicht sichtbar) und sichtbare Glut im Holzkohlegrill (© diddi4 auf pixabay)

Für den Energieaustausch über eine Oberfläche durch Wärmestrahlung ist neben der Temperatur auch die Oberflächenbeschaffenheit wesentlich. Emission und Absorption (also die Abgabe und die Aufnahme von Strahlung) sind am höchsten bei einem sogenannten „schwarzen“ Körper. Dieser reflektiert theoretisch keinerlei IR-Strahlung, sondern absorbiert das gesamte auftreffende Infrarot. Ähnlich wie schwarze Körper verhalten sich im Infrarotbereich alle nichtmetallischen Materialien. Von blanken Metalloberflächen dagegen wird elektromagnetische Strahlung nicht vollständig absorbiert, sondern weitgehend reflektiert.

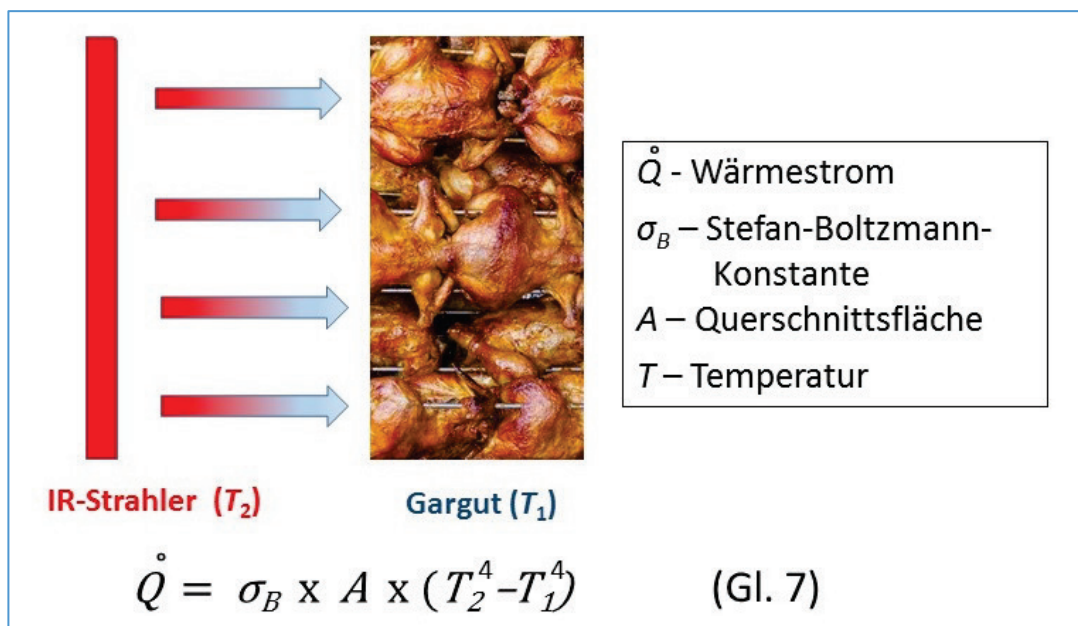


Abb. 2.8: Prinzipbild der infraroten Wärmeübertragung (Foto: G. Gellinger auf pixabay; © E. Schlich)



Die Wärmeübertragung durch IR-Strahlung stellt sich als Gleichgewicht zwischen dem emittierenden und dem absorbierenden Körper dar. Auch hier fließt die Energie immer vom Ort der höheren zum Ort der niedrigeren Temperatur. Das thermodynamische Prinzip der Wärmestrahlung zeigt Abb. 2.8 mit Gl. 7.

Im Unterschied zu Gl. 5 und 6 enthält Gl. 7 nicht die einfache Temperaturdifferenz  $\Delta T$ , sondern die Differenz der vierten Potenzen der Temperaturen als Faktor. Dies entspricht naturwissenschaftlich der Beobachtung, dass IR-Strahler bei hohen Temperaturen sehr viel mehr Strahlungsenergie transportieren als bei niedrigen Temperaturen. Ein einfaches Rechenbeispiel kann das verdeutlichen (siehe Kasten). Dabei ist die Temperatur immer in der thermodynamischen Einheit Kelvin (K) einzusetzen.

#### Rechenbeispiel

**Fall A:**  $T_2 = 393 \text{ K}$ ,  $T_1 = 293 \text{ K}$

Für Gl. 7:  $T_2^4 - T_1^4 = 16,5 \cdot 10^9 \text{ K}^4$

**Fall B:**  $T_2 = 1.393 \text{ K}$ ,  $T_1 = 1.293 \text{ K}$

Für Gl. 7:  $T_2^4 - T_1^4 = 970,26 \cdot 10^9 \text{ K}^4$

In beiden Fällen beträgt die einfache Temperaturdifferenz  $\Delta T$  nur 100 K. Aber der Temperaturfaktor zur Berechnung der Wärmestrahlung ist in Fall B fast 60mal größer als in Fall A. Entscheidend ist also das Temperaturniveau der Wärmestrahlung.

## Wärmedurchgang

In der anwendungstechnischen Praxis treten die oben genannten Mechanismen Wärmeleitung und Konvektion in der Regel gemeinsam auf, mit jeweils unterschiedlichen Anteilen. Zur phänomenologischen Beschreibung dessen dient der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  (in der Baubranche auch als  $k$ -Wert bekannt), wobei die Definitionsgleichung in Gl. 8 formal so aufgebaut ist wie in Gl. 5 und 6:

$$\dot{Q} = U \times A \times (T_2 - T_1) \quad (\text{Gl. 8})$$

So können auch Kombinationen von Werkstoffen unterschiedlicher Wärmeleitung, wie sie etwa im Boden von Gargefäßen gegeben sind, berechnet werden.

## Energieformen im System

Die Gesamtenergie eines thermodynamischen Systems ändert sich, wenn Arbeit und/oder Wärme zu- oder abgeführt werden, wie oben erläutert. Innerhalb der Systemgrenzen kann Energie von einer in die andere Form umgewandelt werden. Für die technischen Anwendungen in Küchen sind die nachfolgend dargestellten Energieformen von Bedeutung.

## Mechanische Energieformen

Zu den mechanischen Energieformen gehört **potentielle Energie  $E_{\text{pot}}$**  (Energie der Lage). Aufgrund der Gravitation bedarf es der potentiellen Energie, um eine Masse um eine bestimmte Höhendifferenz anzuheben (siehe Gl. 9). Diese Energie wird wieder freigesetzt, wenn die Masse um dieselbe Höhendifferenz nach unten fällt.

Die potentielle Energie wird dann zum größten Teil in kinetische Energie umgewandelt, wobei ein kleinerer Teil als Reibungswärme in Anergie übergeht. Die potentielle Energie hat anwendungstechnische Bedeutung z. B. bei der ergonomischen Beurteilung von Arbeitsplätzen, weil das Personal in der Küche bestimmte Massen heben und wieder absetzen muss. Außerdem spielt die potentielle Energie z. B. eine Rolle bei der mechanischen Bewegung der Wäsche in der Rotation der Waschtrommel. Die Rotation der Trommel mit den Mitnehmerflügeln sorgt dafür, dass die Wäsche angehoben wird und wieder in die Waschflotte zurückfällt, um die Waschwirkung zu erzeugen.

$$E_{pot} = m \times g \times \Delta h \quad (\text{Gl. 9})$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad (\text{Gl. 10})$$

$m$  – Masse  
 $g$  – Erdbeschleunigung  
 $h$  – Höhe  
 $v$  – Geschwindigkeit

Zum anderen gehört die **kinetische Energie**  $E_{kin}$  (Energie der Bewegung) zur Gruppe der mechanischen Energieformen. Um eine Masse auf eine bestimmte Geschwindigkeit zu beschleunigen, bedarf es der kinetischen Energie (siehe Gl. 10).

Wie bereits ausgeführt, kann sich potentielle Energie in kinetische Energie umwandeln und umgekehrt. Bei allen Umwandlungsvorgängen geht ein gewisser Anteil der Systemenergie in Anergie über. Die kinetische Energie hat Bedeutung bei Gebläsen (Beispiele: Heißluftbackofen, Konvektomat, Zu- und Abluftanlagen), bei Pumpen (Beispiele: Waschmaschine, Spülmaschine) sowie bei allen lebensmitteltechnischen Verfahren, die auf Rühren, Mixen und Kneten beruhen.

### Thermische Energie (Innere Energie)

Die thermische Energie  $U$  (synonym: Innere Energie) liegt als mikroskopische Schwingungsenergie aller Bausteine der Materie vor. Die Atome und Moleküle schwingen dabei ungeordnet in alle Raumrichtungen, so dass ihre Bewegung äußerlich nicht sichtbar ist. Dies wird als Brown'sche Molekularbewegung der Materie bezeichnet. Je höher die Temperatur, desto intensiver sind die Schwingungen der elementaren Bausteine, das heißt desto intensiver ist die thermische Bewegung.

$$\Delta U = m \times c \times \Delta T \quad (\text{Gl. 11})$$

$m$  – Masse  
 $c$  – Wärmekapazität  
 $T$  – Temperatur

Der absolute Nullpunkt mit der Temperatur  $T = 0 \text{ K}$  oder  $-273,15 \text{ °C}$  ist dadurch definiert, dass die Molekularbewegung zum Stillstand kommt. Die thermische Energie eines Systems ist proportional zur Masse, zur absoluten Temperatur und zur materialabhängigen spezifischen Wärmekapazität. Eine Änderung der Temperatur  $\Delta T$  bewirkt auch eine Änderung der thermischen Energie  $\Delta U$  (Gl. 11).

In der Anwendungstechnik spielt die thermische Energie eines Systems eine überaus wichtige Rolle, sei es in der Lebensmitteltechnik bei Garsystemen, bei der Beheizung und Klimatisierung von Arbeitsräumen oder bei der Kältetechnik.

### Volumenänderungsarbeit (Technische Arbeit)

Die Volumenänderungsarbeit  $W_t$  (synonym: Technische Arbeit) bezeichnet diejenige Energie, die zur Änderung von Druck und Volumen eines Systems erforderlich ist. Dieser Energieterm ist insbesondere für Gase und Flüssigkeiten von Bedeutung, deren Aggregatzustand sich ändert. So muss erheblich Energie zugeführt werden, um eine Flüssigkeit wie z. B. Wasser zu verdampfen. Bei der Kondensation des gasförmigen Wassers (Dampf) wird die zugeführte Energie wieder frei. Aber auch Feststoffe, insbesondere Metalle, dehnen sich bei höherer Temperatur aus. Dazu ist Energie erforderlich. Die Volumenänderungsarbeit ist als Produkt aus Druck und Volumen definiert (Gl. 12).

$$W_t = p \times V \quad (\text{Gl. 12})$$

$p$  – Druck  
 $V$  – Volumen

Diese Energieform hat große Bedeutung in der Kältetechnik (siehe Kap. 2.3) und bei Garverfahren, die mit Verdampfung und Kondensation von Wasser arbeiten (Dampfgarer, Kombidampfgarer, Heißluftdämpfer). Auch Lüftungs- und Klimaanlage müssen bei deren Auslegung und Betrieb die Volumenänderungsarbeit berücksichtigen.

### Enthalpie

Die Enthalpie  $H$  ist die Summe aus innerer Energie  $U$  und Volumenänderungsarbeit  $W_t$ . Diese thermodynamische Größe ist aus anwendungstechnischer Sicht sehr nützlich, weil die Zu- oder Abfuhr von Energie im Normalfall immer alle Zustandsgrößen eines Systems verändert. Das heißt, dass sowohl die Temperatur  $T$  als auch der Druck  $p$  und das Volumen  $V$  im System veränderlich, also eine Funktion der Zeit sind. Dies zeigt die Definition der Enthalpie in Gl. 13:

$$H = U + W_t = m \times c \times \Delta T + p \times V \quad (\text{Gl. 13})$$

$m$  – Masse,  $c$  – Wärmekapazität,  $T$  – Temperatur  
 $p$  – Druck  $V$  – Volumen

Das gilt vor allem für Änderungen des Aggregatzustands (fest/flüssig, flüssig/gasförmig, fest/gasförmig, jeweils in beide Richtungen) und für chemische Reaktionen. Für die Anwendungstechnik in Küchen hat die Enthalpie vor allem Bedeutung für die Verdampfung und Kondensation von Wasserdampf, für die technische Auslegung von Kältekreisläufen sowie für chemische Reaktionen im Lebensmittel oder bei der Verbrennung von Erdgas.

Die zugehörigen thermodynamischen Fachbegriffe sind:

- die spezifische<sup>8</sup> Kondensationsenthalpie  $\Delta h_K$ ,
- die spezifische Verdampfungsenthalpie  $\Delta h_V$  und
- die spezifische Reaktionsenthalpie  $\Delta h_R$ .

Dabei beschreibt die spezifische Kondensationsenthalpie von Wasser, wieviel Energie insgesamt im System freigesetzt wird, wenn 1 kg Wasserdampf vollständig kondensiert. Die spezifische Verdampfungsenthalpie von Wasser ist diejenige Energie, die aufgewendet werden muss, um 1 kg Wasser zu verdampfen.

Die Verdampfungs- und die Kondensationsenthalpie sind mit ca. 2.250 kJ/kg bei Wasser sehr hoch. Dies wird bei Dampfgargeräten und Kombidämpfern mit externen Dampferzeugern dazu genutzt, kurzzeitig sehr viel Energie durch die Kondensation von Wasserdampf auf das Gargut zu übertragen.

Die spezifische Reaktionsenthalpie beschreibt die chemisch gebundene Energie, die frei wird, wenn ein Brennstoff wie z. B. Erdgas verbrannt (oxidiert) wird. Dabei wird pro kg Brennstoff eine bestimmte Energiemenge frei. In der Verbrennungstechnik wird dieser Stoffwert häufig auch als Heizwert bezeichnet. Die Oxidation von Methan als Hauptbestandteil von Erdgas zeigt Gl. 14:



Die spezifische Reaktionsenthalpie (Heizwert) wird hier mit einem Minuszeichen angegeben, da es sich bei der Oxidation (nach rechts gerichteter Ablauf der Reaktion) um eine exotherme Reaktion handelt.

Bei der vollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen entstehen immer Kohlendioxid und Wasser als Verbrennungsprodukte. Wenn durch technische Einrichtungen (Abgaskühler) das Verbrennungswasser kondensiert, kann die freiwerdende Kondensationsenthalpie zusätzlich genutzt werden. Für den Fall der vollständigen Kondensation des Wassers spricht die Verbrennungstechnik dann nicht mehr vom Heizwert, sondern vom Brennwert als Stoffwert des Brennstoffs. Der Heizwert bezeichnet die nutzbare Energie, wenn alle Verbrennungsprodukte bei  $T = 20 \text{ °C}$  gasförmig vorliegen.

<sup>8</sup> Spezifisch: auf die Menge  $N$  (mol), auf das Volumen  $V$  (m<sup>3</sup>) oder auf die Masse  $m$  (kg) bezogen.

Im Gegensatz dazu beschreibt der Brennwert die nutzbare Energie, wenn alle Verbrennungsprodukte bei  $T = 20 \text{ °C}$  vorliegen **und** das Verbrennungswasser vollständig kondensiert ist. Daraus ergibt sich, dass der Brennwert bei Kohlenwasserstoffen immer größer als der Heizwert ist. So ist der Brennwert von Methan mit 55.498 kJ/kg etwa 10 % größer als der Heizwert mit 50.013 kJ/kg. Entsprechende Anlagen sind daher in den Betriebskosten grundsätzlich wirtschaftlicher und wegen der geringeren Emissionen auch umweltfreundlicher. Auf die Technik der Verbrennung geht Kap. 2.2 ausführlicher ein.

### **Elektromagnetische Felder (Elektromagnetische Strahlung)**

In der Küchentechnik spielen neben der Wärmestrahlung als elektromagnetische Strahlung (siehe oben) auch die **Mikrowelle** und die **Induktion** eine anwendungstechnische Rolle. Dabei handelt es sich um elektromagnetische Felder im jeweils zugehörigen Wellenlängenbereich.

Mit dem Begriff „Mikrowelle“ ist ein weites Frequenzspektrum elektromagnetischer Felder von 1 - 500 GHz<sup>9</sup> umschrieben. Für die Anwendung zur Erwärmung von Lebensmitteln hat sich eine Frequenz von 2,450 GHz etabliert. Dies entspricht einer Wellenlänge von ca. 12,2 cm. Die Einwirkung von Mikrowellen auf Lebensmittel gilt nicht als Wärmetransport, weil die Energieübertragung dabei durch Hochfrequenzstrahlung erfolgt. Diese regt insbesondere die Wassermoleküle in Lebensmitteln zu hochfrequenten Schwingungen an. Dies führt sekundär zur Aufheizung und Regeneration des Lebensmittels.

In gewerblichen Küchen finden sich Mikrowellengeräte zur Regeneration von Lebensmitteln allenfalls im Imbiss, Food-Truck oder in der Low-Level-Gastronomie, zumal eine größere Stückzahl servierfertiger Lebensmittel in einem Mikrowellengerät nicht möglich ist. Im Airline-Catering an Bord sind Mikrowellengeräte nicht zulässig. Alle marktgängigen Geräte erfüllen die Sicherheitsrichtlinien und Normen, u. a. die EMV-Richtlinie 2014/30/EU Elektromagnetische Verträglichkeit.

Technik und Details von Mikrowellengeräten werden in Teil III des Handbuchs ausführlicher behandelt (erscheint voraussichtlich 2021).

Ebenso wird im Induktionskochfeld zunächst elektromagnetische Energie übertragen, die erst im Topfboden durch sogenannte Wirbelströme Wärme erzeugt. Dazu erzeugt eine stromdurchflossene Spule im Induktionskochfeld ein magnetisches Wechselfeld, das an einer ferromagnetischen Schicht (ferritischer Stahl) im Boden des Gargefäßes ankoppelt. Die Frequenz liegt dabei im Bereich der unteren Langwellen von 25 bis 50 kHz.<sup>10</sup> Die hochfrequente Umpolung des Magnetfelds erzeugt die oben genannten Wirbelströme und führt so zur Erwärmung des Topfbodens.

<sup>9</sup> GHz: Gigahertz =  $10^9$  Hertz. Ein Hertz bedeutet eine Schwingung pro Sekunde.

<sup>10</sup> kHz: 1 Kilohertz = 1.000 Schwingungen pro Sekunde.

Für Induktion geeignete Gargefäße stehen mit dem Induktionskochfeld in elektromagnetischer Wechselwirkung. Alle marktgängigen Induktionskochfelder erfüllen die Sicherheitsrichtlinien und Normen zur Elektromagnetischen Umweltverträglichkeit (EMUV) und zur Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV).

Induktionskochfelder setzen sich zunehmend im Privathaushalt und in gewerblichen Küchen durch, dies vor allem wegen der kurzen Aufheizzeiten und der guten Regelbarkeit. Zudem wird das Induktionskochfeld selbst nicht sehr heiß. Lediglich der Wärmeübergang vom heißen Topfboden zurück an das Kochfeld führt zu dessen Erwärmung. Von Nachteil ist allerdings, dass auf Induktionskochfeldern nur induktionsgeeignete Gargefäße nutzbar sind. Induktionskochfelder werden in Teil III des Handbuchs behandelt (erscheint voraussichtlich 2021).

### Wärmestrom und Leistung: zeitbezogene energetische Größen

Unter dem **Wärmestrom** ist das Verhältnis der in ein System übertragenen Wärme  $Q$  zur dazu aufgewendeten Zeit  $t$  zu verstehen. Dies kann sowohl in Form einer Differenzgleichung als auch - allgemeiner - als Differentialgleichung geschrieben werden. Zur Unterscheidung des Wärmestroms von der Wärme erhält die Größe  $Q$  einen darüber gesetzten Punkt (siehe auch Gl. 5 - 8). Die SI-Einheit des Wärmestroms ist das Watt:  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ , wobei auch dezimale Vielfache wie mW, kW, MW oder GW üblich sind (Erläuterungen dazu siehe Tab. 2.4).

Im allgemeinen Fall ist die pro Zeiteinheit übertragene Wärme - also der Wärmestrom - nicht konstant, sondern ändert sich mit der Zeit. Es handelt sich mithin um einen instationären Vorgang. So schaltet ein Glaskeramikkochfeld während der Ankochzeit die volle elektrische Leistung, bis die Siedetemperatur erreicht ist. Anschließend wird die elektrische Leistung des Kochfeldes reduziert, um so den Garprozess fortzuführen (Fortkochzeit). Die insgesamt übertragene Wärme ergibt sich rechnerisch aus dem Integral des instationären Wärmestroms über die Zeit. Insofern handelt es sich bei der Wärme um eine integrale und beim Wärmestrom um eine differentielle Größe (Gl. 15).

$$Q = \int \dot{Q}(t) dt \quad (\text{Gl. 15})$$

$Q$  – Wärme,  $\dot{Q}$  – Wärmestrom,  $t$  – Zeit

Unter der **Leistung  $P$**  ist das Verhältnis der verrichteten Arbeit  $W$  zur dazu aufgewendeten Zeit  $t$  zu verstehen. Die SI-Einheit der Leistung ist das Watt (W)<sup>11</sup>, mit der Definition:  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/1 s}$ .

Auch hier sind dezimale Vielfache (mW, kW, MW, GW) üblich (siehe Tab. 2.4).

#### Leistung, Arbeit und Zeit

$$P = W/t \text{ und } W = P \cdot t$$

**Fall A:**  $W = 360 \text{ kJ}$ ,  $t = 3.600 \text{ s}$   
ergibt:  **$P = 100 \text{ W} = 0,1 \text{ kW}$**

**Fall B:**  $W = 360 \text{ kJ}$ ,  $t = 360 \text{ s}$   
ergibt:  **$P = 1.000 \text{ W} = 1 \text{ kW}$**

Wenn also dieselbe Arbeit  $W$  in nur einem Zehntel der Zeit  $t$  verrichtet wird, so ist eine um den Faktor 10 größere Leistung  $P$  erforderlich.

<sup>11</sup> In verwirrender Weise wird der Buchstabe W auch für die physikalische Größe der Arbeit benutzt, dann aber zur Unterscheidung gemäß DIN-Norm *kursiv* geschrieben (siehe Kasten).



Wenn dieselbe Arbeit in einer kürzeren Zeit verrichtet wird, ist die Leistung entsprechend höher, und umgekehrt. Ein anschauliches Beispiel dazu zeigt der nebenstehende Kasten. Auch hier gilt für den allgemeinen Fall, dass die gesamte Arbeit, die in einem Prozess verrichtet wird, sich rechnerisch aus dem Integral der instationären Leistung über die Zeit ergibt (siehe Abb. 2.9 und Gl. 16).

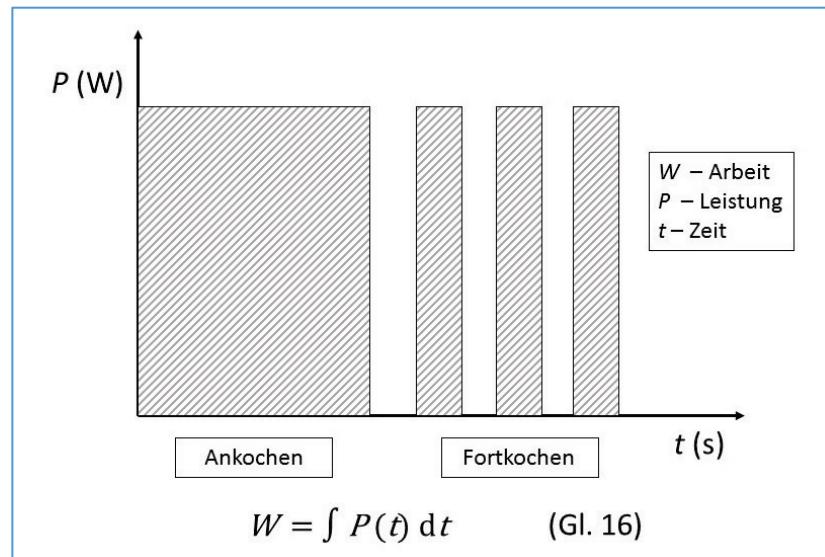


Abb. 2.9: Leistung, Arbeit und Zeit am Beispiel eines getakteten Glaskeramikkochfelds mit Ankochautomatik

Am Ende des Ankochvorgangs schaltet das Glaskeramikkochfeld die volle Leistung aus und erst nach Bedarf wieder an (Taktung). Die schraffierte Fläche in Abb. 2.9 stellt die verrichtete elektrische Arbeit des Kochfelds dar. Diese wird über den Zeitverlauf aufsummiert, rechnerisch also im allgemeinen Fall integriert (Gl. 16).

Ein gutes Beispiel zur messtechnischen Erfassung der Leistung als instationäre Funktion der Zeit ist das in jedem Haushalt vorhandene Energiemessgerät (umgangssprachlich: Stromzähler), das über einen bestimmten Zeitraum die gesamte genutzte Elektroenergie addiert, und so die Abrechnung für das EVU ermöglicht. Je höher die aktuell abgerufene Leistung ist, umso schneller dreht sich das Zählerrad eines elektromechanischen Energiemessgeräts.

## Wirkungsgrad

Unter dem Wirkungsgrad  $\eta$  ist das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand zu verstehen. Nutzen und Aufwand sind dabei in derselben Einheit anzugeben. Denn der Wirkungsgrad ist dimensionslos und wird entweder als Dezimalbruch oder in Prozent angegeben. So kann z. B. die Erzeugung von Elektroenergie aus Steinkohle (= Umwandlung von Primär- in Endenergie) in einem EVU mit Hilfe des Wirkungsgrads des Kraftwerks bewertet werden. Dieser errechnet sich aus dem Verhältnis von insgesamt erzeugter Endenergie zur insgesamt eingesetzten Primärenergie. Dabei muss derselbe Bilanzzeitraum für Nutzen und Aufwand zugrunde liegen, um valide Aussagen zu erhalten (siehe Abb. 2.10 und Gl. 17).

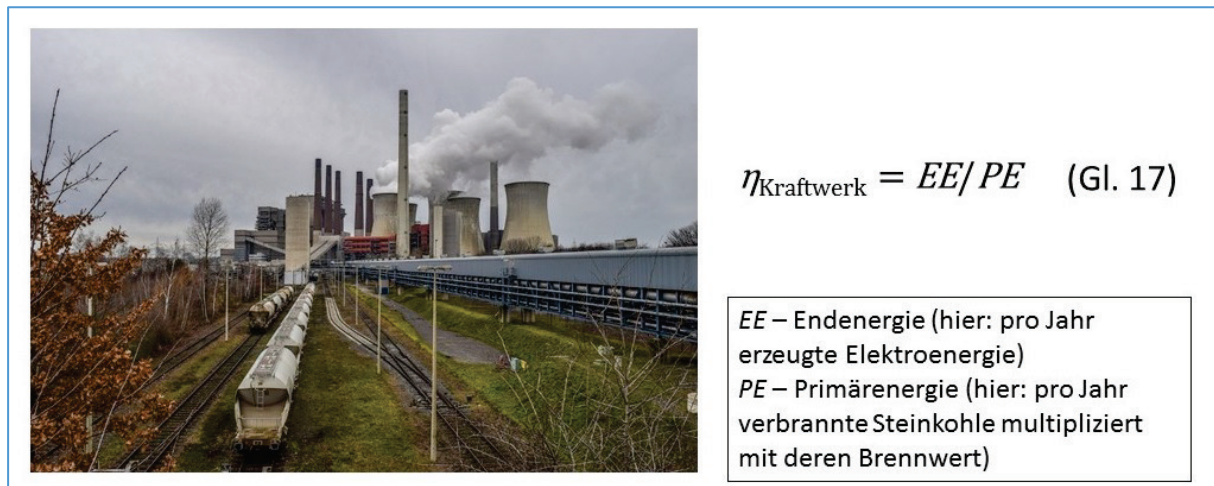


Abb. 2.10: Steinkohlekraftwerk mit Anlieferung der Steinkohle und Kühltürmen für die Abgabe der Abwärme in die Umwelt (Foto: M. Gaida auf pixabay, © E. Schlich)

Der thermische Wirkungsgrad eines Kohlekraftwerks liegt etwa bei 40 - 45 %. Aus der Energiebilanz des Systems geht hervor, dass der nicht genutzte Anteil der Primärenergie (im Beispiel also 55 - 60 %) als „Verlustwärme“ in die Umgebung abgegeben wird (siehe Prinzipbild in Abb. 2.1 und Kühltürme in Abb. 2.10).

Wie oben bereits ausgeführt heißt das aus thermodynamischer Sicht, dass die Energie jeweils aus Exergie (= arbeitsfähiger Anteil) und Anergie (= nicht arbeitsfähiger Anteil) besteht, wobei sich die Anergie bei jeder Energieumwandlung vergrößert. Die Summe der beiden Energieanteile bleibt jedoch in der klassischen Physik gleich.

In der Anwendungstechnik ist deutlich zwischen Arbeits- und Leistungswirkungsgrad zu unterscheiden. Ein Leistungswirkungsgrad setzt die Nutzleistung ins Verhältnis zur aufgewendeten Leistung. So stellt z. B. der Leistungswirkungsgrad eines Glaskeramikkochfelds das Verhältnis von abgegebenem Nutzwärmestrom zur elektrischen Leistung des Kochfelds dar.



© congerdesign auf pixabay

Der Ankochwirkungsgrad desselben Glaskeramikkochfelds ergibt sich hingegen aus dem Verhältnis von Nutzwärme zur aufgewendeten elektrischen Energie. Wirkungsgrade sind also immer dimensionslos, da in allen Fällen gleichartige Größen das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand bilden.

## Übersicht zu energetischen Größen und Einheiten

Tab. 2.3 zeigt eine Übersicht die hier verwendeten Größen und deren SI-Einheiten. Abkürzungen für gängige Dezimalvorsätze der Einheiten sind in Tab. 2.4 erläutert.

Tab. 2.3: Thermodynamische Größen und Einheiten aus dem Energiebereich

Größe	Symbol	Einheit (Name)	Bemerkung
Energie	$E$	J (Joule)	Weitere übliche Einheiten sind: kJ, MJ, GJ, kWh, MWh, GWh
Arbeit	$W$	J (Joule)	Elektrische Arbeit häufig in kWh; 1 kWh = 3.600 kJ
Wärme	$Q$	J (Joule)	Die Einheit „Kalorie“ ist seit 1948 veraltet.
Innere Energie	$U$	J (Joule)	synonym: Thermische Energie
Volumenänderungsarbeit	$W_t$	J (Joule)	Druck (N/m <sup>2</sup> ) mal Volumen (m <sup>3</sup> ) = 1 J
Enthalpie	$H$	J (Joule)	Früher „Fühlbare Wärme“ genannt.
Leistung	$P$	W (Watt)	Weitere Einheiten sind: mW, kW, MW, GW. Die Einheit PS ist seit 1948 veraltet.
Wärmestrom	$\dot{Q}$	W (Watt)	Die Einheit kcal/h ist seit 1948 veraltet.
Temperatur	$T$	K (Kelvin), °C (Grad Celsius)	Eine Temperatur von 0 °C entspricht 273,15 K.
Druck	$p$	Pa (Pascal)	1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup> ; üblich sind auch hPa, MPa. Veraltete Einheit: 1 bar = 0,1 MPa.
Volumen	$V$	m <sup>3</sup> (Kubikmeter)	Weitere Einheiten sind cm <sup>3</sup> , dm <sup>3</sup> . Angabe in Liter (l): 1 m <sup>3</sup> = 1.000 l.
Thermodynamische Stoffwerte			
spezifische Wärmekapazität	$c$	kJ/(kg · K)	Auf die Masse bezogener Stoffwert
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	W/(m · K)	Aus dem Griechischen; sprich: Lambda.
Wärmeübergangskoeffizient	$a$	W/(m <sup>2</sup> · K)	Aus dem Griechischen; sprich: Alpha.
Wärmedurchgangskoeffizient	$U$	W/(m <sup>2</sup> · K)	Verwechslungsgefahr mit Innerer Energie.
Stefan-Boltzmann-Konstante	$\sigma_B$	W/(m <sup>2</sup> · K <sup>4</sup> )	Aus dem Griechischen; sprich: Sigma B.

Tab. 2.4: Gängige Dezimalvorsätze (Präfixe) gemäß SI-System

Symbol	Name	Zehnerpotenz	Symbol	Name	Zehnerpotenz
n	Nano	10 <sup>-9</sup>	h	Hekto	10 <sup>2</sup>
μ	Mikro	10 <sup>-6</sup>	k	Kilo	10 <sup>3</sup>
m	Milli	10 <sup>-3</sup>	M	Mega	10 <sup>6</sup>
c	Centi	10 <sup>-2</sup>	G	Giga	10 <sup>9</sup>
d	Dezi	10 <sup>-1</sup>	T	Tera	10 <sup>12</sup>

## Wahl der Endenergieträger

Auch in gewerblichen Küchen spielt die Wahl der Endenergieträger eine wichtige Rolle. Allerdings ist hier zwischen dem Interesse des Eigentümers, ggf. des Vermieters und dem Interesse des Betreibers zu unterscheiden, ähnlich wie bei privaten Haushalten. So besteht im Grunde keine Wahlfreiheit mehr, wenn eine bereits fertig eingerichtete Großküche einem Betreiber als Mietobjekt zur Verfügung steht. Die Auswahl von Endenergieträgern steht daher eher bei der Küchenplanung zur Debatte. Manchmal ist am Ort der Küche auch nur ein einziger Energieträger verfügbar. Daher gibt es also nur bei der Neueinrichtung oder der Sanierung von gewerblichen Küchen die Möglichkeit der Auswahl von Energieträgern.

Grundsätzlich können küchentechnische Verfahren mit verschiedenen Endenergieträgern durchgeführt werden. Zu diesen gehören vor allem Elektroenergie, Erdgas, Flüssiggas, Nah- und Fernwärme sowie Dampf. Welche Endenergie für eine bestimmte Anwendung eingesetzt werden soll, hängt von technischen, ökonomischen und ökologischen Kriterien ab.

Für eine Reihe von Anwendungen kommt nur Elektroenergie in Betracht, insbesondere für Antriebe in Pumpen, Gebläsen, Rührgeräten, Küchenmaschinen, für Lüftungs-, Klima- und Kälteanlagen sowie für die Raumbelichtung. Aber auch Heizungs- und Warmwasseranlagen auf Erdgas oder Heizölbasis benötigen immer Elektroenergie für die Regelung und die Umwälzpumpe.

## Verwendung von Elektroenergie

Elektroenergie hat den Vorteil, als leitungsgebundene Endenergie am Ort und zur Zeit des Verbrauchs zur Verfügung zu stehen. Zudem besteht Elektroenergie aus reiner Exergie, ist also vollständig arbeitsfähig. Die spezifischen Kosten setzen sich für Tarifkunden und gewerbliche Kunden aus einem Leistungs- und einem Arbeitspreis zusammen. Der Leistungspreis richtet sich dabei nach der maximal zur Verfügung stehenden elektrischen Leistung des Netzanschlusses. Diese Maximalleistung stellt das EVU zu jeder Zeit sicher.

Der **Leistungspreis** gehört insofern zu den Fixkosten und kann auch als Grundgebühr der Elektroversorgung verstanden werden. Diese wächst mit der Spitzenleistung, die ein EVU für den Endkunden zu jeder Zeit sicherstellen muss. Die höchste Spitzenleistung tritt am späten Vormittag oder frühen Abend auf, die niedrigste nachts. Da es für EVU und den Endkunden unwirtschaftlich ist, die Versorgung auf eine Spitzenlast auszulegen, werden Lastspitzen durch Tarifgestaltung und digitales **Lastmanagement** begrenzt. So schalten Elektrogeräte mit großer Speicherkapazität wie z. B. Kühlgeräte oder Warmwasserspeicher über Fernsteuerung seitens EVU kurzzeitig ab, unmerklich für den Betrieb. Bei genügendem Angebot an Elektroenergie schalten die Geräte automatisch wieder ein.

Näheres zum Thema Lastmanagement auf Basis digitaler Technik findet sich in Teil I, Kap. 1.7 (Titel des Kapitels: Großküche 4.0) dieses Handbuchs.

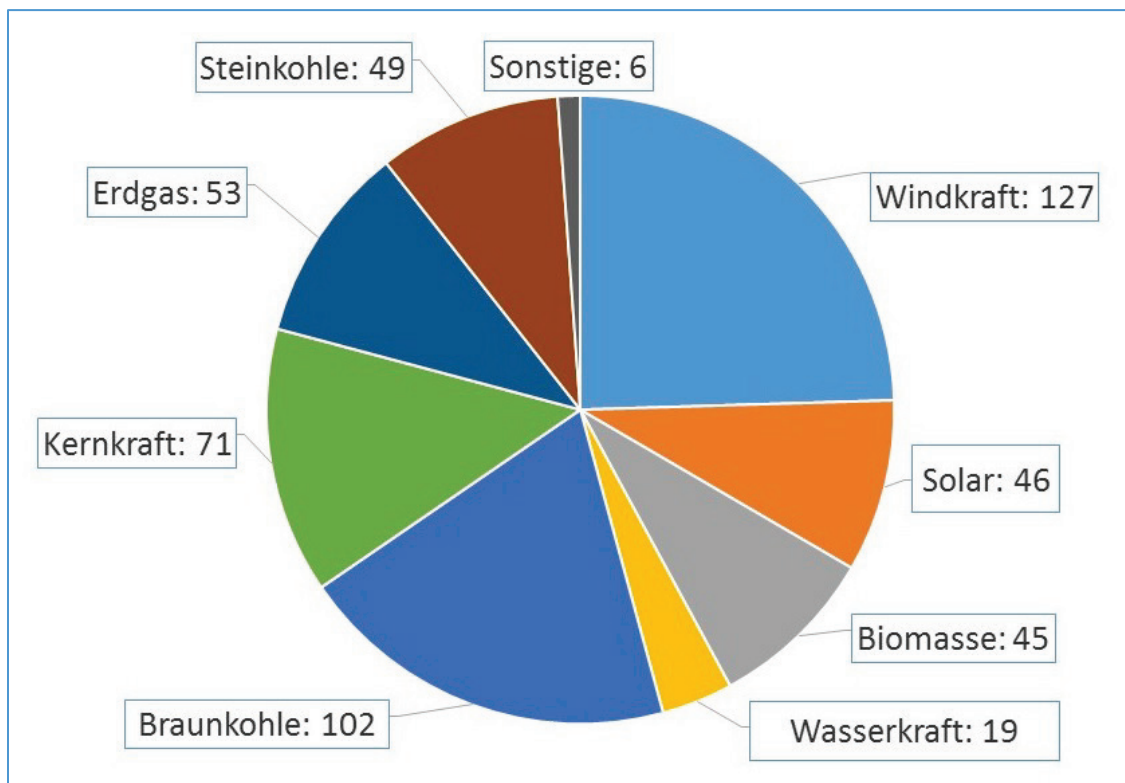


Abb. 2.11: Nettostromerzeugung Deutschland 2019; Angaben in Terawattstunde (Daten von Fraunhofer-ISE; [www.energycharts.de](http://www.energycharts.de), zuletzt abgerufen am 18.03.2020)

Der **Arbeitspreis** ist hingegen die variable Komponente der Elektroversorgung. Hier wird die in einem definierten Zeitraum - z. B. monatlich - abgenommene Endenergie mit einem vertraglich vereinbarten Preis abgerechnet. Zur Abrechnung dient ein in der Zuleitung (Stromanschluss) installierter Energiezähler, der in vereinbarten Intervallen - z. B. jährlich - oder kontinuierlich digital abgelesen wird. Die kontinuierliche digitale Ablesung ist auch unter dem Begriff „smart metering“ bekannt. Dadurch wird das EVU bzw. dessen Netzmanagement in die Lage versetzt, Elektroenergie zum passenden Zeitpunkt am Ort des Verbrauchs zur Verfügung zu stellen. Dieser Aspekt ist vor allem für regenerative Energieträger wie Windkraftwerke und Photovoltaikanlagen von großer Bedeutung, da hier auf der Erzeugerseite große kurzzeitige Schwankungen auftreten können. Die Jahresstromerzeugung in Deutschland zeigt Abb. 2.11, mit insgesamt 518 TWh bei einem Anteil regenerativer Energieträger von ca. 48 %.

Gewerbekunden, wie z. B. Großküchen, gehören zu den „Sondervertragskunden“ (SV-Kunden) eines EVU. Leistungs- und Arbeitspreis sind Gegenstand individueller Verträge zwischen EVU und Endkunde. Dabei wird der jährliche Bereitstellungspreis meist nach dem jährlichen Durchschnitt der höchsten Leistung bestimmt, die monatlich während einer Viertelstunde mindestens in Anspruch genommen worden ist.



Für gewerbliche Küchen der Gemeinschaftsgastronomie ist eine mittägliche Spitze im Leistungsverlauf typisch (siehe Abb. 2.12).

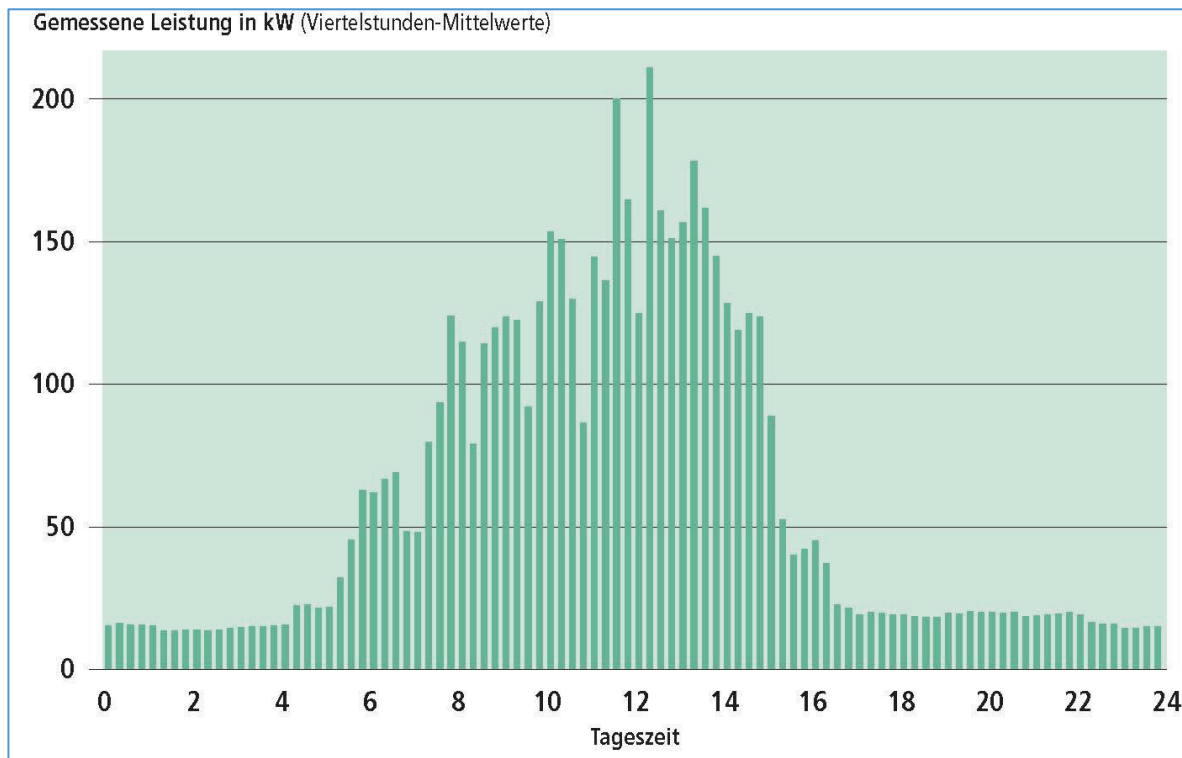


Abb. 2.12: Typischer Leistungsverlauf in einer Küche der Gemeinschaftsgastronomie

Jede Leistungsspitze verursacht hohe Gesamtkosten. Durch eine gleichmäßigere Verteilung des Bedarfs an Elektroenergie mittels einer Reduktion der Spitzenlast können die Kosten erheblich gesenkt werden. Der jeweilige Energieversorger einer gewerblichen Küche unterstützt auch aus eigenem Interesse seine Endkunden mit technisch-wirtschaftlichem Sachverstand, um die Netzstabilität bei schwankendem Angebot und schwankender Nachfrage und damit die Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

Die Europäische Union hat bereits 1998 damit begonnen, einen sogenannten Elektrizitätsbinnenmarkt zu etablieren. Denn speziell leitungsgebundene Endenergieträger können ein sogenanntes „natürliches Monopol“ bilden, das den Wettbewerb einschränkt oder verhindert. Seitdem sind Energieerzeuger und Netzbetreiber getrennte Akteure im Energiemarkt. Sondervertragskunden wie Dienstleister und professionelle Küchen der Individual- und Gemeinschaftsgastronomie können daher ebenso wie Privathaushalte den Anbieter wechseln, um bessere Vertragsbedingungen in technischer, ökonomischer oder ökologischer Hinsicht zu generieren. Daher ist jeder Endkunde im Energiemarkt gut beraten, seinen Energieversorger im Hinblick auf die Tarifstruktur, die Herkunft der Elektroenergie - Stichwort: Ökostrom - und die Versorgungssicherheit auszuwählen.



## Verwendung von Erdgas

Die Nutzung von Erdgas als leitungsgebundenem Endenergieträger ist in der gewerblichen Küche aus ökonomischen und ökologischen Gründen zumindest immer dann empfehlenswert, wenn eine Renovierung ansteht oder neue Geräte zu beschaffen sind. Erdgas bietet sich als vielseitiger und in der Handhabung wenig anspruchsvoller Endenergieträger für gewerbliche Küchen an. Auch Erdgaslieferungen werden mit Leistungs- und Arbeitspreis abgerechnet.

Erdgas bietet sich in der professionellen Küche insbesondere für Kochstellen (Gasbrenner) an, dies vor allem wegen der schnellen Regelung. Allerdings sind bei Erdgaskochstellen besondere Anforderungen an die Raumlüftung zu stellen, da die offene Verbrennung von Erdgas Sauerstoff aus der Raumluft benötigt und Abgase (Kohlendioxid, Wasser) sowie Schadgase (Kohlenmonoxid, Stickoxide) in die Raumluft abgibt.

Insofern müssen die Zu- und Abluftanlagen der Küche entsprechend dimensioniert werden. Zudem ist wie bei allen gasbeheizten thermischen Geräten eine Verriegelung des Gaskochfelds gegen die Lüftungsanlagen vorgeschrieben: Ohne Lüftungsbetrieb kann die Kochstelle nicht arbeiten (siehe Kap. 2.5).

Grundlagen der Verbrennung sind in Kap. 2.2 dargestellt. Gaskochstellen werden in Teil III des Handbuchs behandelt (erscheint voraussichtlich 2021).

Auch bei Erdgas als leitungsgebundenem Endenergieträger sind Gasanbieter und Netzbetreiber juristisch getrennt. Insofern kann ein Betrieb der Individual- oder Gemeinschaftsgastronomie auch hier den Anbieter frei wechseln, um bessere Vertragsbedingungen zu erhalten, ähnlich wie im Elektroenergiemarkt.

## Verwendung weiterer Endenergieträger

Wo kein Erdgasnetz zur Verfügung steht, bietet sich Flüssiggas als Alternative an. Dabei handelt es sich um ein Gemisch von Propan ( $C_3H_8$ ) und Butan ( $C_4H_{10}$ ), das unter geringem Überdruck in flüssiger Form vorliegt. Bei Flüssiggas handelt es sich um einen nicht leitungsgebundenen Endenergieträger, der im Tank bevorratet werden muss. Alle gasbetriebenen Geräte - Kochstellen, Heizungen, Warmwasser- und Dampferzeuger - müssen auf die Verwendung von Flüssiggas angepasst werden, indem dafür geeignete Düsen eingesetzt werden.

Neben Erd- oder Flüssiggas kann für gewerbliche Küchen auch Heizöl (EL) genutzt werden, dies meistens jedoch zur Erzeugung von Niederdruckdampf (NDD). Dabei steht in der Heizzentrale des Gebäudes oder in einem der Küche benachbarten Raum ein Dampferzeuger, der Dampf mit einem Absolutdruck von 0,2 MPa (Überdruck: 0,1 MPa = 1 bar) bei einer Dampftemperatur von ca. 120 °C liefert (siehe Abb. 2.13).

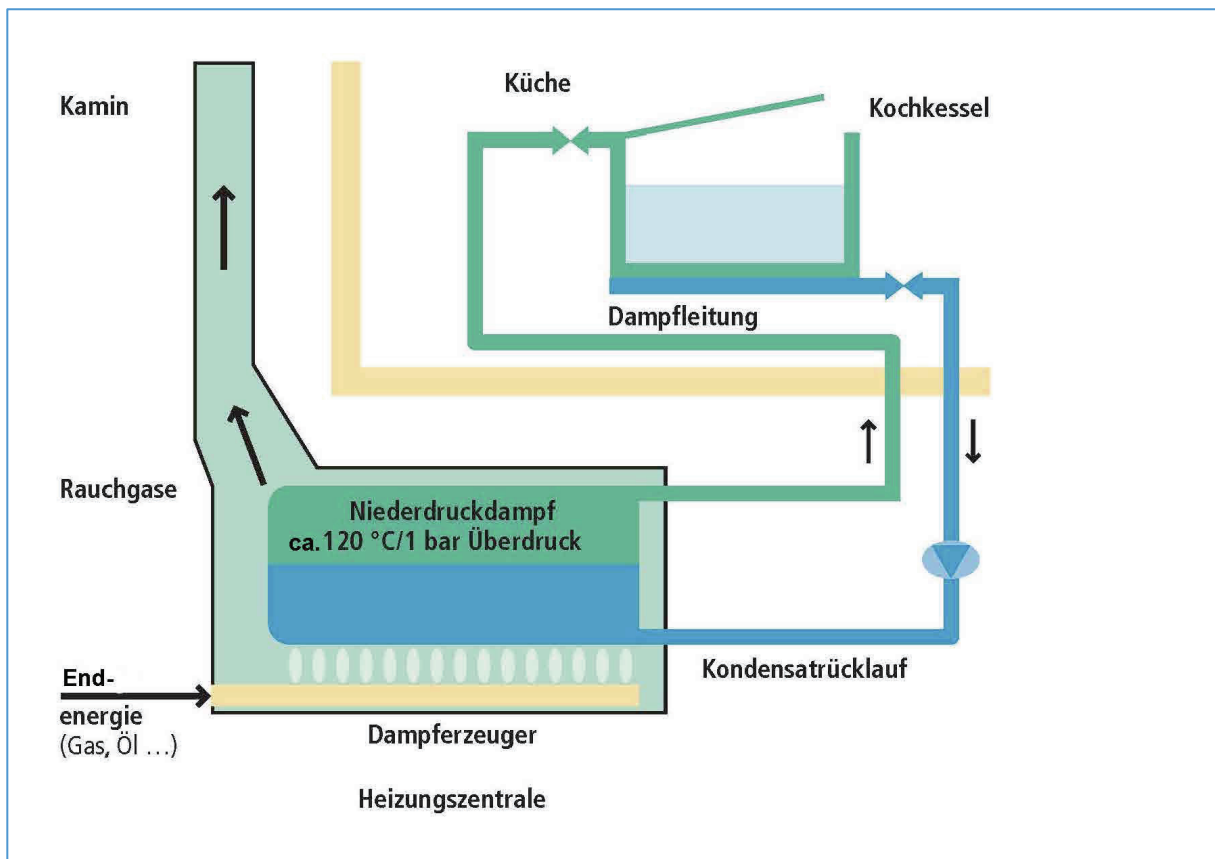


Abb. 2.13: Kochkesselbeheizung durch Niederdruckdampf

Der Dampf wird durch isolierte Rohrleitungen zu den Küchengeräten geleitet, meist zu Kochkesseln oder den Tanks einer Spülmaschine. Dort kondensiert er in einem Wärmetauscher und gibt mit seiner Kondensationsenthalpie dieselbe Energie wieder ab, die vorher für die Verdampfung von flüssigem Wasser erforderlich war. Die Verdampfungs- und Kondensationsenthalpie von Wasser beträgt bei den genannten Temperaturbedingungen etwa 2.250 kJ/kg. Eine Anschlussleistung des Geräts von 50 kg/h Dampf entspricht daher einer Leistung von etwa 31 kW.

Das Kondensat wird durch eine Rohrleitung zum Dampferzeuger zurückgeführt und mit einer Pumpe wieder in den Kessel gedrückt. Bei der Neuinstallation einer Küche oder einer grundlegenden Renovierung mit Anschaffung neuer Geräte können sich die Investitionen in einen Dampfanschluss für die Küche amortisieren, sofern bereits ein zentraler Dampferzeuger - z. B. für die Hauswäscherei - vorhanden ist.

Weil sich Niederdruckdampf nur für Geräte eignet, die keine höheren Temperaturen als etwa 125 °C erfordern (z. B. Kochkessel und Spülmaschinen), wird er stets in Kombination mit anderen Energieträgern eingesetzt. Dabei kann Erdgas für Geräte mit höherem Temperaturbedarf und Elektroenergie für mechanische Geräte vorgesehen werden. Der energetische Verbund ermöglicht eine Optimierung hinsichtlich Kosten und Umweltbelastung. Beim Elektro-NDD-Verbund gelingt es in einer gewerblichen Küche, rund zwei Drittel des Energiebedarfs über Endenergieträger wie Heizöl (EL) und Erdgas zu decken und so die Betriebskosten gegenüber einer elektrischen Vollversorgung erheblich zu senken.

## Umweltaspekte

Bei der Betrachtung von Umweltwirkungen steht der Einsatz und Gebrauch von Endenergie in allen Bereichen besonders im Fokus, so auch in der Individual- und der Gemeinschaftsgastronomie. Ein rationeller Energieeinsatz ist nicht nur aus ökonomischen, sondern auch aus ökologischen Gründen sinnvoll. Denn grundsätzlich hat jede Verwendung von Endenergie auch eine Wirkung auf die Umwelt. Allerdings unterscheiden sich Endenergieträger je nach Herkunft und Bereitstellung in ihrer Umweltwirkung.

Umweltaspekte in gewerblichen Küchen sind bereits in Teil I des vorliegenden Handbuchs ausführlich behandelt worden, insbesondere in Kap. 1.5: Management und Verpflegung (S. 42 f) und in Kap. 1.6: Ökologie (S. 47-52). Dort finden sich neben Aussagen zur Bedeutung von Umweltmanagementsystemen (UMS) auch gebündelte Informationen zu den Themen Energieeinsparung, Wärmerückgewinnung und Emissionssenkung sowie aktuelle Daten zur CO<sub>2</sub>-Abgabe verschiedener Endenergieträger (siehe Teil I, Tab. 1.1, S. 51).

Für Elektroenergie wird hier ein bundesweiter Mittelwert 474 g CO<sub>2</sub> pro kWh (2018) angegeben. Hier sei zusätzlich angemerkt, dass sich die aktuellen Emissionswerte von regionalen EVU sehr unterscheiden können. Zudem bietet jeder Energieversorger inzwischen auch CO<sub>2</sub>-freien Ökostrom aus Solar-, Wind- und Wasserkraft an. Angesichts der teilweise rasanten Entwicklung im Markt der regenerativen Erzeugung von Elektroenergie ist jeder Betreiber im angesprochenen Bereich gut beraten, aktuelle Daten des EVU abzurufen und die Vertragsgestaltung daraufhin zu überprüfen.

Bei Erdgas oder Heizöl (EL) als Endenergieträger sind die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen jedoch nicht ortsabhängig, sondern nur abhängig von der chemischen Zusammensetzung des jeweiligen Brennstoffs. Eine in Deutschland zunehmende Beimischung von Biogas zu Erdgas oder von Rapsölderivaten zu Heizöl oder Kraftstoffen senkt zukünftig die spezifische CO<sub>2</sub>-Emission dieser Endenergieträger.



## 2.2 Grundlagen der Verbrennung

### **Elmar Schlich<sup>12</sup>**

Unter Verbrennung ist im vorliegenden küchentechnischen Zusammenhang die chemische Umsetzung von technischen Brennstoffen mit Sauerstoff zu verstehen. Dabei wird der Sauerstoff der Umgebungsluft entnommen. Anwendungstechnische Bedeutung als Brennstoffe in gewerblichen Küchen haben Heizöl, Erdgas und Flüssiggas. Diese Brennstoffe bestehen im Wesentlichen aus organischen Kohlenstoffverbindungen.

Verbrennung ist immer eine chemische Reaktion in der Gasphase. Feste und flüssige Brennstoffe müssen also vor der eigentlichen Verbrennung unter Energieumsatz in die Gasphase überführt werden. Als Umwandlungsprozesse kommen hierfür Verflüssigung, Verdampfung und Vergasung in Frage. Ein anschauliches Beispiel dafür bietet eine Wachskerze mit festem Brennstoff, deutlich erkennbarer flüssiger Phase und darüber sichtbar leuchtender Gasflamme (Abb. 2.14).



Abb. 2.14: Wachskerze mit fester, flüssiger und gasförmiger Phase (© S. Theaker auf pixabay)

Für die Phasenänderungen ist jeweils Energie erforderlich, die Schmelzenthalpie für fest/flüssig und die Verdampfungsenthalpie für flüssig/gasförmig. Diese Energie entstammt der chemisch gebundenen Energie (Reaktionsenthalpie), die durch die Verbrennung selbst freigesetzt wird. Daher steht bei festen oder flüssigen Brennstoffen grundsätzlich weniger Nutzenergie zur Verfügung als bei gasförmigen Brennstoffen. Denn dort kann die bei der Verbrennung frei werdende Reaktionsenthalpie insgesamt genutzt werden, weil keine energetischen Aufwendungen für die Umwandlung durch Verflüssigung, Verdampfung, Ent- oder Vergasung des Brennstoffs anfallen.

<sup>12</sup> Prof. i.R. Dr.-Ing. Elmar Schlich, Justus-Liebig-Universität Gießen, Professur für Prozesstechnik in Lebensmittel- und Dienstleistungsbetrieben <[elmar.schlich@ernaehrung.uni-giessen.de](mailto:elmar.schlich@ernaehrung.uni-giessen.de)>.



## Entstehung und Zusammensetzung technischer Brenngase

### Erdgas

Erdgas ist erdgeschichtlich im Zusammenhang mit der Bildung von Erdöl und von Kohlelagerstätten entstanden. Erdgas besteht zu 85 - 95 Vol.-% aus Methan  $\text{CH}_4$  - je nach Lagerstätte. Neben  $\text{CH}_4$  sind in geringem Maße höhere Kohlenwasserstoffe als brennbare Anteile sowie Stickstoff, Kohlendioxid und Wasser als nicht brennbare Anteile von Erdgas zu nennen. Gasversorgungsunternehmen in Deutschland kaufen Erdgas als Primärenergie ein und verkaufen es nach Reinigung und Standardisierung als Erdgas H (H = High) mit hohem und Erdgas L (L = Low) mit niedrigem Methangehalt. Diese beiden Erdgasgruppen unterscheiden sich geringfügig in der spezifischen Reaktionsenthalpie (Heizwert) des Gasgemischs. Angaben zur genauen Zusammensetzung und zum Heizwert sind beim jeweiligen Versorger zu erhalten.

### Flüssiggas

Flüssiggase sind die bei der Destillation von Rohöl anfallenden Kopfprodukte der Erdölraffination. Sie bestehen aus höheren aliphatischen Kohlenwasserstoffen, im wesentlichen Propan  $\text{C}_3\text{H}_8$  und Butan  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ . Meist werden Gemische eingesetzt, wobei im Winter mehr Propan beigemischt wird, da Butan aufgrund seiner höheren Erstarrungstemperatur schneller einfriert. Da Propan und Butan bei Normaltemperaturen unter vergleichsweise geringem Überdruck flüssig sind, haben sie gegenüber Erdgas den Vorteil des geringeren Transportvolumens. Bei der Öffnung des Entnahmeventils verdampft die Flüssigkeit, so dass der Brennstoff in der Gasphase entnommen werden kann. Die hierzu notwendige Verdampfungsenthalpie entnimmt die verdampfende Flüssigkeit aus der Umgebung. Dies kann insbesondere bei niedriger Umgebungstemperatur zu Eisansatz am Ventil bis hin zu vollständiger Vereisung führen, mit der Folge von Betriebsstörungen.



Abb. 2.15: Handelsübliche Propangasflaschen (© Flyerwerk auf pixabay)



Flüssiggas wird in der Regel dort zur Energieversorgung von Betrieben und Haushalten eingesetzt, wo kein stationäres Erdgasnetz vorhanden ist. Dazu muss Flüssiggas als nicht leitungsgebundener Endenergieträger in Gastanks oder -flaschen bevorratet werden (Abb. 2.15).

Im Unterschied zu Methan sind Propan und Butan schwerer als Luft. Bei Undichtigkeiten der Anlage würde sich das austretende Flüssiggas am Boden ansammeln. Deshalb ist sicherheitstechnisch vorgeschrieben, eine bodennahe Entlüftung vorzusehen oder die Tanks außen zu lagern. Zudem sind regelmäßige Inspektionen und Dichtheitsprüfungen durch zugelassene technische Sachverständige gesetzlich vorgeschrieben (siehe Technische Regeln Flüssiggas 2012, TRF 2012).



Abb. 2.16: Heizstrahler in der Außengastronomie (© joekanyou auf pixabay)

Typische Anwendungen für Flüssiggas gibt es in der mobilen Gastronomie und der Außengastronomie als Kochgas sowie als Heizgas für Infrarotstrahler (Abb. 2.16). Im Ausland (z. B. Mittelmeerländer, Entwicklungsländer) ist Flüssiggas weit verbreitet, wobei dort gut ausgebaute Lieferstrukturen und Pfandsysteme bei den Flüssiggasbehältern zu finden sind.

### Heizwert und Brennwert

Bei der vollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen entstehen über zahlreiche Zwischenprodukte letztlich immer die finalen Verbrennungsprodukte Kohlendioxid  $\text{CO}_2$  und Wasser  $\text{H}_2\text{O}$ . Liegen die Verbrennungsprodukte bei Umgebungstemperatur ( $T = 20\text{ °C}$ ) gasförmig vor, so bezeichnet man die bei der vollständigen Verbrennung freiwerdende spezifische Reaktionsenthalpie als Heizwert.

Bei vollständiger Kondensation des Verbrennungsprodukts  $\text{H}_2\text{O}$  kann zusätzlich zum Heizwert die freiwerdende Kondensationsenthalpie genutzt werden. Die dann nutzbare spezifische Energie wird als Brennwert bezeichnet, wenn sowohl die Reaktionsenthalpie des Brennstoffs als auch die Kondensationsenthalpie des Verbrennungswassers genutzt wird. Dabei muss das Verbrennungsprodukt  $\text{CO}_2$  bei Umgebungstemperatur gasförmig und das Verbrennungsprodukt  $\text{H}_2\text{O}$  bei Umgebungstemperatur ( $T = 20\text{ °C}$ ) vollständig flüssig vorliegen.

Heizwert und Brennwert wichtiger technischer Brennstoffe sind in Tab. 2.5 dargestellt, jeweils auf Masse in kg bezogen. Die Umrechnung auf volumenbezogene Stoffwerte ist über die Dichte des Brennstoffs möglich.

Tab. 2.5: Heizwert, Brennwert und Dichte technischer Brennstoffe (Bandbreite je nach exakter Zusammensetzung; genaue Daten sind beim jeweiligen Energieversorger zu erhalten)

Brennstoff	Heizwert (kJ/kg)	Brennwert (kJ/kg)	Dichte (kg/m <sup>3</sup> )
Erdgas (L - H)	32.000 - 45.000	36.000 - 50.000	0,7 - 0,84
Flüssiggas	45.000 - 46.000	49.000 - 50.000	510 (flüssig)
Heizöl	42.600	45.400	820 - 845

Wie Tab. 2.5 zeigt, ist der Brennwert nicht einfach die Addition von Heizwert und spezifischer Kondensationsenthalpie von Wasser, da unterschiedliche Bezugsgrößen vorliegen: Heizwert und Brennwert beziehen sich auf die Brennstoffmasse, die spezifische Kondensationsenthalpie aber auf die entstehende Wassermasse. Deshalb ergibt sich der Brennwert aus einer Addition des Heizwertes mit der nutzbaren Kondensationsenthalpie, die über eine Berechnung des Verbrennungswassers bestimmt werden kann.

### Sauerstoff- und Luftbedarf der Verbrennung

Zur vollständigen Verbrennung wird eine Mindestmenge an Sauerstoff benötigt. Diese Mindestmenge ist für jedes Gas unterschiedlich und lässt sich mit der Formulierung der chemischen Reaktion der Verbrennung bestimmen. Die chemische Reaktionsgleichung gibt immer die jeweiligen Stoffmengen  $n$  (mol) der Reaktanden an. Dabei entspricht 1 mol jedes Stoffs der Anzahl  $N = 6,02214076 \cdot 10^{23}$  an Atomen oder Molekülen (d.i. die Avogadro-Konstante  $N_A$  in der Einheit mol<sup>-1</sup>).

Die anwendungstechnische Verbrennungsrechnung arbeitet jedoch eher mit dem Volumen  $V$  (m<sup>3</sup>) oder - besser noch - mit der Masse  $m$  (kg). Denn die Verbrennungsrechnung unter Angabe der Masse bietet den Vorteil, dass Masse als Erhaltungsgröße bilanziert werden kann. Aus der Reaktionsgleichung ist hierzu eine Umrechnung mit Hilfe der molaren Masse (kg/mol) der Stoffe erforderlich. Die dazu notwendigen Daten für die wichtigsten Atome und Moleküle zeigt Tab. 2.6.

Tab. 2.6: Molare Massen von Atomen und Molekülen für die Verbrennungsrechnung (die für die Atomphysik wichtigen Nachkommastellen sind hier vernachlässigbar)

Atom	molare Masse (kg/mol)	Molekül	molare Masse (kg/mol)
Wasserstoff H	1	Wasserstoff H <sub>2</sub>	2
Kohlenstoff C	12	Methan CH <sub>4</sub>	16
Stickstoff N	14	Wasser H <sub>2</sub> O	18
Sauerstoff O	16	Kohlendioxid CO <sub>2</sub>	44

Aus Tab. 2.6 wird auf einfache Weise sichtbar, dass die molare Masse von Molekülen durch die Addition der molaren Massen der atomaren Bestandteile berechnet werden kann. Beispiel: Propan  $C_3H_8$  hat die molare Masse 44 kg/mol ( $= 3 \cdot 12 + 8$ ).

### Beispiel: Verbrennung von Wasserstoff ( $H_2$ )

Als einfaches Beispiel zeigt Tab. 2.7 die Mengen- und die Massenbilanz der Oxidation von molekularem Wasserstoff ( $H_2$ ).

Tab. 2.7: Oxidation von molekularem Wasserstoff zu Wasser

	Brennstoff		Sauerstoff		Produkt
Mengenbilanz	1 mol $H_2$	+	$\frac{1}{2}$ mol $O_2$	$\leftrightarrow$	1 mol $H_2O$
Umrechnung	↓		↓		↓
Massenbilanz	2 kg $H_2$	+	16 kg $O_2$	=	18 kg $H_2O$

Die Zahlenwerte der Mengenbilanz für die Verbrennung von Wasserstoff ( $1 + \frac{1}{2} \rightarrow 1$ ) zeigen, dass die vorliegende Reaktion **nicht äquimolar** abläuft. Die Massenbilanz hingegen ( $2 \text{ kg} + 16 \text{ kg} = 18 \text{ kg}$ ) stimmt. Dies ist erkennbar an der Verwendung des physikalisch und mathematisch korrekten Gleichheitszeichens. Denn die Masse  $m$  ist eine Erhaltungsgröße, ein Vorteil, der zur Überprüfung der Gleichungen genutzt werden kann. Aus der Massenbilanz ist auch ersichtlich, dass der spezifische Sauerstoffbedarf bei der Verbrennung von Wasserstoff 8 kg  $O_2$ /kg  $H_2$  beträgt.

### Beispiel: Verbrennung von Methan ( $CH_4$ )

Als anwendungstechnisches Beispiel zeigt Tab. 2.8 die Mengen- und die Massenbilanz der Oxidation von reinem Methan  $CH_4$  als Hauptbestandteil von Erdgas.

Tab. 2.8: Oxidation von reinem Methan zu Kohlendioxid und Wasser

	Brennstoff		Sauerstoff		Produkte
Mengenbilanz	1 mol $CH_4$	+	2 mol $O_2$	$\leftrightarrow$	1 mol $CO_2$ + 2 mol $H_2O$
Umrechnung	↓		↓		↓
Massenbilanz	16 kg $CH_4$	+	64 kg $O_2$	=	44 kg $CO_2$ + 36 kg $H_2O$

Diese chemische Reaktion läuft laut Mengenbilanz **äquimolar** ab ( $1 + 2 = 3$ ). Die Massenbilanz (linke Seite = rechte Seite) dokumentiert das Prinzip der Massenerhaltung im System:  $16 \text{ kg} + 64 \text{ kg} = 44 \text{ kg} + 36 \text{ kg} = 80 \text{ kg}$ . Daraus ist zusätzlich ersichtlich, dass die vollständige Verbrennung von 16 kg Methan genau 64 kg an Sauerstoff benötigt. Damit beträgt der spezifische Sauerstoffbedarf der Verbrennung von Methan 4 kg  $O_2$  pro kg  $CH_4$ . Da küchentechnische Anwendungen Umgebungsluft und keinen reinen Sauerstoff nutzen, muss der Luftstickstoff in die Bilanz der Verbrennungsrechnung einbezogen werden.

Die Massenbilanz der Verbrennung von reinem Methan mit Luft zeigt Abb. 2.17, hier nun dargestellt als kontinuierliche Verbrennung von 1 kg/h Methan.

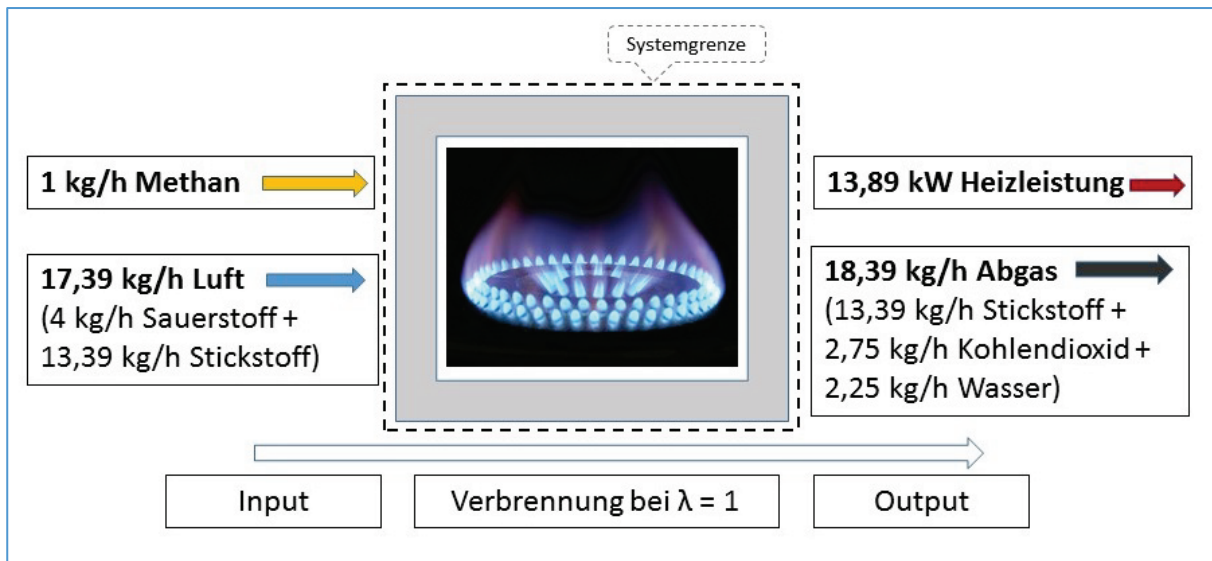


Abb. 2.17: Massen- und Energiebilanz der stöchiometrischen Verbrennung von 1 kg/h Methan (Foto: Magnascan auf pixabay; © E. Schlich)

Wenn bei einer kontinuierlich arbeitenden Verbrennung der Massenstrom eines Brennstoffs bekannt ist, ergibt sich aus dessen Produkt mit dem spezifischen Sauerstoffbedarf der zur vollständigen Verbrennung notwendige Massenstrom  $O_2$ . Dieser wird auch als **stöchiometrischer Sauerstoffbedarf** bezeichnet. Da der Sauerstoffanteil in der Luft ca. 21 Volumen-% oder 23 Massen-% beträgt, kann hieraus der **stöchiometrische Luftbedarf** einer Verbrennung berechnet werden. Dabei ist darauf zu achten, bei der Massenbilanz den Massenanteil  $O_2$  in Luft (ca. 23 %) und nicht den Volumenanteil  $O_2$  in Luft (ca. 21 %) zu benutzen.

Zur Erzielung einer vollständigen Verbrennung muss dieser stets etwas mehr Luft zugeführt werden als theoretisch notwendig ist. Dieser sogenannte Luftüberschuss beträgt je nach Brennstoff und Feuerungsart 10 - 40 %. Die Luftverhältniszahl  $\lambda^{13}$  - auch gelegentlich Luftfaktor genannt - beschreibt das Verhältnis zwischen dem theoretischen und dem tatsächlichen Luftbedarf. Daher ergibt ein Luftüberschuss von z. B. 20 % eine Luftverhältniszahl von  $\lambda = 1,2$ .

Drei typische Bereiche werden verbrennungstechnisch unterschieden:

- $\lambda < 1 \Rightarrow$  unterstöchiometrische Verbrennung;
- $\lambda = 1 \Rightarrow$  stöchiometrische Verbrennung sowie
- $\lambda > 1 \Rightarrow$  überstöchiometrische Verbrennung.

Durch die Messung der Abgaszusammensetzung lassen sich diese drei Bereiche signifikant voneinander unterscheiden.

<sup>13</sup>  $\lambda$ : Aus dem Griechischen; sprich Lambda.

Bei der **unterstöchiometrischen** Verbrennung finden sich im Abgas erhebliche Anteile an unverbrannten Kohlenwasserstoffen (z. B. Formaldehyd und andere), außerdem Kohlenoxid CO und Ruß C<sub>n</sub> (elementarer Kohlenstoff), aber kein Sauerstoff. Ein Beispiel für unterstöchiometrische Verbrennung ist die Einstellung moderner Otto-Motoren knapp unterhalb  $\lambda = 1$ . Auf diese Weise kann die erste Stufe eines der Verbrennung nachgeschalteten Katalysators Stickoxide im Abgas zu Stickstoff reduzieren. Das ist nur ohne Sauerstoff im Abgas möglich. In der zweiten Stufe des Katalysators werden die nicht oxidierten Kohlenwasserstoffe und das Kohlenoxid (CO) oxidiert. Dieser sog. Drei-Wege-Katalysator wird anhand der Luftverhältniszahl  $\lambda$  mit der danach benannten Lambda-Sonde geregelt.

Bei der **optimalen (leicht überstöchiometrischen)** Verbrennung sinkt der Anteil an nicht verbrannten Kohlenwasserstoffen sowie an Kohlenmonoxid (CO) auf ein Minimum. Der überschüssige Sauerstoff findet sich im Abgas wieder. Messtechnisch wird hier in der Regel auf CO<sub>2</sub> als Indikator zurückgegriffen. Würde jedoch zu viel Luft zugeführt, steigt der Anteil an CO und an nicht verbrannten Kohlenwasserstoffen wieder an, weil die Verbrennungstemperatur durch die Zufuhr der Verbrennungsluft absinkt. Insofern ist auch die Konzentration an Kohlenoxid im Abgas ein guter Indikator für die richtige Einstellung des Luftfaktors.

Gasbrenner an Kochstellen, Brauchwasser- oder Kesselanlagen in gewerblichen Küchen sind immer knapp überstöchiometrisch eingestellt. Dabei werden typischerweise Werte für  $\lambda = 1,1 - 1,3$  benutzt, je nach Brenngas und Anwendungsfall.

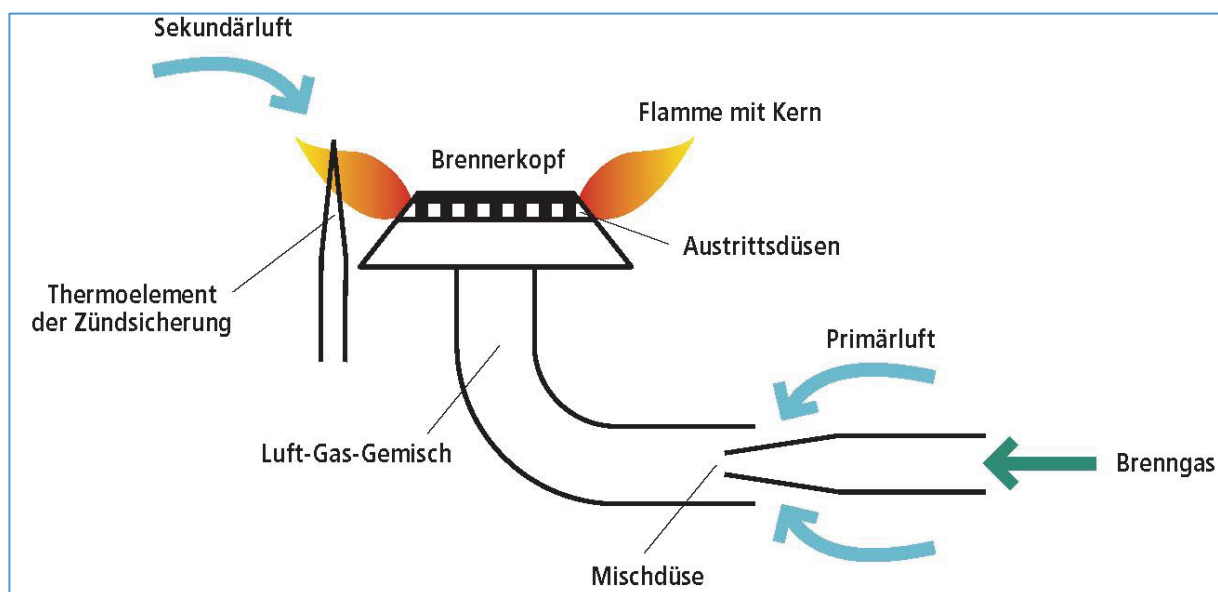


Abb. 2.18: Prinzipbild einer Gaskochstelle mit Luftvormischung und Sekundärluft

Zur Erreichung einer vollständigen und damit auch umweltfreundlichen Verbrennung werden Brenngas und Verbrennungsluft bei technischen Verbrennungsanlagen immer vorgemischt. Dazu saugt ein Ringspalt in der Mischdüse ca. 60 % der benötigten Luft in das Brenngas. Das Gas/Luftgemisch strömt zum Brennerkopf und entzündet sich an der bereits brennenden Flamme.

Die Flamme holt sich die benötigte restliche Sekundärluft aus der Umgebung. Überwacht wird die Verbrennung an der Kochstelle von einer thermoelektrischen Züandsicherung, bestehend aus einem Thermoelement an der Flamme und einem Magnetventil in der Gaszufuhr (siehe Prinzipbild in Abb. 2.18).

Gasbrenner höherer Leistung (Warmwasser, Heizung, Dampferzeuger) werden optisch mit einer Fozelle oder mit Ionisationselektroden überwacht. Diese sog. Flammenwächter reagieren erheblich schneller als ein Thermoelement, wenn die Flamme ausfällt, und schalten die Gaszufuhr zuverlässig ab.

Die technische Einstellung von Mischdüse, Ringspalt, Züandsicherung und Flammenwächter ist werkseitig auf das Brenngas (Erdgas, Flüssiggas) angepasst und darf keinesfalls vom Betreiber, sondern nur von dafür qualifiziertem Fachpersonal gewartet, geändert oder ausgetauscht werden.

Der Grenzwert für CO im Abgas liegt bei 100 mg/m<sup>3</sup>. Bei Konzentrationen von CO in der Raumluft von 0,1 Vol.-% besteht akute Lebensgefahr. Technische Erdgasflammen weisen bei guter Einstellung maximal CO-Werte von ca. 10 - 30 mg/m<sup>3</sup> auf. Seitens des Küchenbetreibers ist darauf zu achten, dass die notwendige Frischluftzufuhr für die Gasbrenner gewährleistet ist. Zusätzlich sorgt auch die technische Erstabnahme und jährliche Überwachung aller Verbrennungsanlagen durch den Schornsteinfeger für die betriebliche Sicherheit.

Die saubere und umweltfreundliche Verbrennung hängt nicht nur von ausreichender Sauerstoffversorgung, sondern auch von der Temperatur der Flamme sowie der Verweilzeit des zu verbrennenden Gases in der Flamme ab. Die Flammentemperatur liegt dabei im Bereich von 800 bis 900 °C.

### Leistungsberechnung der Verbrennung

Die Leistung einer technischen Verbrennungseinrichtung kann aus dem Massenstrom des Brennstoffs und dem massebezogenen Heiz- oder Brennwert berechnet werden. Möglich wäre auch die Berechnung der Leistung unter Nutzung des Volumenstroms des Brennstoffs und des volumenbezogenen Heiz- oder Brennwertes. In jedem Fall ist auf die Homogenität der verwendeten Einheiten zu achten, wie das Beispiel im nebenstehenden Kasten zeigt.

#### Leistungsberechnung für 1 kg/h CH<sub>4</sub>

Heizwert  $h = 50.013 \text{ kJ/kg}$

$P = 1 \text{ kg/h} \cdot 50.013 \text{ kJ/kg} / 3.600 \text{ s}$

**$P = 13,8925 \text{ kJ/s} = 13,8925 \text{ kW}$**

#### Leistungsberechnung für 1 m<sup>3</sup>/h CH<sub>4</sub>

Hier muss der volumenbezogene Heizwert benutzt werden:

Heizwert  $h = 35.890 \text{ kJ/m}^3$

$P = 1 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 35.890 \text{ kJ/m}^3 / 3.600 \text{ s}$

**$P = 9,97 \text{ kJ/s} = 9,97 \text{ kW}$**

Auf Details und Technik gasbeheizter Geräte für gewerbliche Küchen geht Teil III des Handbuchs ausführlicher ein (erscheint voraussichtlich 2021).



## 2.3 Grundlagen der Kältetechnik

### *Elmar Schlich<sup>14</sup> und Astrid Klingshirn<sup>15</sup>*

Kältetechnik ist aus den modernen Betrieben und Haushalten in der Industrie- und Dienstleistungsgesellschaft nicht mehr wegzudenken. Unter dem Begriff der Kältetechnik werden im vorliegenden Zusammenhang alle technischen Einrichtungen zur Kühlung und zum Gefrieren von Lebensmitteln sowie Anlagen zur Klimatisierung von Räumen, Transporteinrichtungen oder Fahrzeugen zusammengefasst.

Zur Erzeugung von Kälte gibt es eine ganze Reihe verschiedener Verfahren, die sich hinsichtlich ihrer technischen Komplexität, ihrer ökonomischen Bedeutung und der Nutzungsgewohnheiten der Verbraucher unterscheiden. Das bedeutendste Verfahren für gewerbliche Küchen und Lebensmitteltechnik ist das Kompressorverfahren, auf das im Folgenden ausführlich eingegangen wird. Geringere Bedeutung haben Absorptionskälteanlagen, die wegen ihrer geringen Geräuschentwicklung vor allem für Hotelzimmer oder Wohnmobile genutzt werden.

Allen kältetechnischen Verfahren ist gemeinsam, dass durch Zufuhr von Endenergie ein thermodynamisches **Ungleichgewicht** - die Differenz zwischen Kühlraum- und Umgebungstemperatur - hergestellt und beibehalten wird. Dies kann in offenen und geschlossenen Systemen erreicht werden.

### **Offene Systeme**

Das einfachste Verfahren zur Kühlung besteht darin, das zu kühlende Gut mit einer Flüssigkeit zu benetzen oder mit feuchten Tüchern zu umgeben, um die durch Verdunstung oder Verdampfung entstehende Kälte zu nutzen. Damit die Moleküle eines Stoffes aus der flüssigen in die gasförmige Phase übergehen, muss die Verdampfungsenthalpie  $\Delta H_v$  aufgewendet werden. Dies ist derjenige Energiebetrag, der erforderlich ist, um sowohl die Temperatur (Innere Energie  $U$ ) als auch Druck und Volumen (Volumenänderungsarbeit  $W_t$ ) einer Flüssigkeit während des Phasenübergangs in den gasförmigen Zustand zu verändern. Die Verdampfungsenthalpie entzieht dem zu kühlenden Gut Energie, wodurch dessen Temperatur abnimmt.

Der Vorgang des Verdampfens einer Flüssigkeit wird von verschiedenen Faktoren befördert oder behindert. Dabei sind sowohl die Stoffeigenschaften der verdampfenden Flüssigkeit als auch die Umgebungsbedingungen von Interesse. Die Verdampfungsgeschwindigkeit steigt bei Annäherung an die Siedetemperatur eines Stoffes an, wobei diese wiederum eine Funktion des Druckes ist. Verdampft oder verdunstet Wasser an Luft, so richtet sich die Verdampfungsgeschwindigkeit nach der aktuellen Temperatur, der Luftbewegung und dem zugehörigen Dampfdruck.

---

<sup>14</sup> Prof. i.R. Dr.-Ing. Elmar Schlich, Justus-Liebig-Universität Gießen, Professur für Prozesstechnik in Lebensmittel- und Dienstleistungsbetrieben <[elmar.schlich@ernaehrung.uni-giessen.de](mailto:elmar.schlich@ernaehrung.uni-giessen.de)>.

<sup>15</sup> Prof. Dr. Astrid Klingshirn, Hochschule Albstadt-Sigmaringen, Professur für Lebensmitteltechnologie <[klingshirn@hs-albsig.de](mailto:klingshirn@hs-albsig.de)>

Dampfdruck und Temperatur sind über die Dampfdruckkurve miteinander verknüpft. Ist der Dampfdruck aufgrund der niedrigen Temperatur relativ klein, so kann der Stoffaustausch zwischen dem flüssigen Wasser und der Umgebungsluft durch eine Vergrößerung der Verdampferoberfläche und eine Beschleunigung des Luftaustauschs verbessert werden. Für die kältetechnische Anwendung bedeutet die Erhöhung der Verdampfungsgeschwindigkeit gleichzeitig eine Erhöhung der Kälteleistung.

Prinzipiell ist es also möglich, die Tatsache, dass zum Verdampfen einer Flüssigkeit Energie benötigt wird, für eine kältetechnische Anwendung zu nutzen. Das einfachste Beispiel hierfür ist die Verwendung poröser Tonkrüge zur Lagerung von Getränken. Hierbei wird die Kühlung dadurch erreicht, dass an der Oberfläche des Tonkrugs Flüssigkeit verdampft, die aus dem Inneren des Tonkrugs stammt. Hier kann also auch die Verdampfung des Getränkes selbst für dessen Kühlung herangezogen werden.



© C. Sonnemans, pixabay

Diese einfache Kühltechnik arbeitet nur dann zuverlässig, wenn Energie zugeführt wird, z. B. über Sonneneinstrahlung. Zudem handelt es sich bei den beschriebenen kältetechnischen Verfahren um **offene** Systeme, die nicht nur im Energieaustausch, sondern auch im Stoffaustausch mit ihren Nachbarsystemen stehen. Die Flüssigkeit, die als Kältemittel zur Anwendung kommt, kann nicht im Kreislauf geführt und so rezykliert werden, sondern wird in die Umgebung abgegeben. Dies bedeutet einerseits, dass die kältetechnischen Verfahren nur solange zuverlässig arbeiten, wie Flüssigkeit zur Verdampfung zur Verfügung steht. Deshalb handelt es sich vom Wesen her um instationäre, diskontinuierliche Verfahren.

Andererseits können als Kältemittel nur solche Flüssigkeiten in Frage kommen, deren Verdampfung und nachfolgende Abgabe an die Umgebung keine weitergehenden Schäden verursacht. Als Kältemittel für offene Systeme kommen daher im wesentlichen Wasser, in seltenen Fällen Ethanol (Alkohol) zur Anwendung. Nach der Gesamtenergiebilanz für eine bestimmte Zeitspanne eines solchen Vorganges ergibt sich die Verminderung der inneren Energie des Kühlraums  $\Delta U$  aus dem Betrag der spezifischen Verdampfungsenthalpie  $\Delta h_v$  multipliziert mit der Masse der verdampften Flüssigkeit  $m$ .

Neben dem Nachteil des offenen Systems, das mit seiner Umgebung nicht nur im Energie-, sondern vor allem auch im Stoffaustausch steht, sind bei der Verwendung von Wasser als Kältemittel nur geringe Temperaturdifferenzen zur Umgebungstemperatur erreichbar. Dies liegt am geringen Dampfdruck und der daher niedrigen Verdampfungsgeschwindigkeit des Wassers bei Umgebungstemperatur. Gefriertemperaturen sind mit Wasser als Kältemittel im offenen System nicht möglich. Die spezifische Verdampfungsenthalpie von Wasser ist je nach Temperatur mit Werten von 2.000 bis 2.500 kJ/kg vergleichsweise jedoch sehr hoch.

## Geschlossene Systeme

Aus den genannten Gründen scheidet Wasser als Kältemittel zur Erreichung der lebensmitteltechnisch erforderlichen Temperaturen in Kühl- und Gefrierräumen aus. Zur Kühlung von Lebensmitteln werden typischerweise Kühlraumtemperaturen im Bereich von +0,5 bis +8 °C, beim Gefrieren von bis zu -30 °C benutzt. Für globale Ferntransporte von Lebensmitteln sind Gefriertemperaturen bis -40 °C anwendbar.

Aus dem bisher Gesagten können nun Bedingungen abgeleitet werden, die an eine Flüssigkeit gestellt werden müssen, wenn diese als geeignetes Kältemittel verwendet werden soll. Die wichtigste thermodynamische Bedingung besteht darin, dass ein Kältemittel bereits bei einer Temperatur möglichst weit unterhalb der Kühl- und Gefrierraumtemperatur verdampfen muss. Denn nur aufgrund eines Temperaturgefälles zwischen dem Kühl- oder Gefrierraum und der verdampfenden Flüssigkeit kann Energie in Form von Wärme aus dem Kühl- oder Gefrierraum abtransportiert werden.

Kältemittel sind definiert als Fluide, die zur Wärmeübertragung in einer Kälteanlage eingesetzt werden und unter Änderung ihres Aggregatzustandes bei niedriger Temperatur und niedrigem Druck Wärme aufnehmen und bei höherer Temperatur und höherem Druck wieder abgeben (DIN EN 378-1). Dazu sind spezifische physikalische Eigenschaften wie große spezifische Verdampfungsenthalpie, hohe volumetrische Kälteleistung, große Wärmeleitfähigkeit, hohe kritische Temperatur und niedrige Viskosität notwendig. Idealerweise sollten Kältemittel zudem nicht brennbar oder explosiv, nicht giftig und bei Austritt durch Geruch wahrnehmbar sein. Entscheidend ist zudem die Umweltverträglichkeit.

Zu unterscheiden sind sogenannte natürliche Kältemittel<sup>16</sup> wie Kohlenwasserstoffe, Kohlendioxid oder Ammoniak, und synthetische, d. h. künstlich erzeugte Kältemittel wie Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (H-FCKW) sowie Fluorkohlenwasserstoffe und teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (FKW und H-FKW).

Viele der synthetischen Kältemittel sind umweltbelastend. Dies bezieht sich insbesondere auf den langfristigen Ozonabbau in der oberen Atmosphäre und auf die Treibhauswirkung. Der Einsatz von Kältemitteln, die ein hohes Ozonabbaupotential haben (ODP-Wert<sup>17</sup>), ist seit geraumer Zeit eingeschränkt bzw. verboten. Seit 2015 besteht zudem ein Verwendungsverbot für alle teilhalogenierten Ozon abbauenden Kältemittel (H-FCKW) sowie auch für aufgearbeitete Kältemittel (EU Nr. 2037/2000).

---

<sup>16</sup> Auch „**natürliche Kältemittel**“ werden für die großtechnische Anwendung industriell hergestellt.

<sup>17</sup> **ODP:** Ozone Depletion Potential.

Der Einsatz von Kältemitteln mit hohem Treibhauspotential (GWP-Wert<sup>18</sup>), was vor allem fluorierte Gase (F-Gase) und damit nahezu alle aktuell gängigen und verwendeten Kältemittel für die Kälte- und Klimatechnik betrifft, wird seit dem 01. Januar 2015 in der sogenannten F-Gase-Verordnung (EU VO Nr. 517/2014) geregelt. Der GWP-Wert definiert das relative Treibhauspotential in Bezug auf CO<sub>2</sub> - auch CO<sub>2e</sub> (e steht für equivalent) oder CO<sub>2</sub>-Äquivalent genannt. Diese Kenngröße beschreibt die Wirkung der Emission auf die mittlere Erwärmung über einen Zeitraum von 100 Jahren. So hat z. B. das Kältemittel R-134a ein CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 1.430. Das bedeutet, dass die Emission von 1 kg R-134a innerhalb der ersten 100 Jahre nach der Freisetzung dieselbe Treibhauswirkung aufweist wie die Emission von 1.430 kg CO<sub>2</sub>.

Einige fluorierte Kältemittel sind ab bestimmten Zeitpunkten vollständig verboten, andere werden durch ein „Phase-down“, das die in den Verkehr gebrachte Menge deutlich einschränkt und damit verteuert, im Einsatz zurückgefahren. Auch im Rahmen von Arbeiten zur Instandhaltung und Wartung einschließlich wiederholter Befüllung dürfen die von der Regelung erfassten Kältemittel keine Anwendung mehr finden.

Natürliche Kältemittel wie Propan (R-290), Isobutan (R-600a) und Kohlendioxid (R-744) haben ein zu vernachlässigendes Treibhauspotential und stellen Alternativen zum noch weit verbreiteten Kältemittel Tetrafluorethan (R-134a) und zum Kältemittelgemisch R-404a dar. Zudem finden zunehmend ungesättigte fluorierte Treibhausgase wie Tetrafluorpropen (R-1234yf) einen Einsatz als Kältemittel.

Tab. 2.9: Eigenschaften ausgewählter Kältemittel mit ODP = 0

Kältemittel	Siedetemperatur (°C) bei Umgebungsdruck	Druck (bar) bei Siedetemperatur			brennbar	giftig	GWP (kg CO <sub>2e</sub> )
		-30 °C	0 °C	40 °C			
R-134a (Tetrafluorethan)	- 40,8	0,8	2,9	10,2	nein	nein	1.430
R-404a (Gemisch)	- 46,5	201	6,1	18,2	nein	nein	3.900
R-290 (Propan)	- 42,2	1,7	4,7	13,7	ja	nein	20
R-600a (Isobutan)	- 11,7	0,5	1,6	5,3	ja	nein	20
R-717 (Ammoniak)	- 33,3	1,2	4,3	15,5	ja	ja	<1
R-744 (Kohlendioxid)	- 78,4 (Sublimation)	14,3	34,8	90-120	nein	<10 % nein	1
R-1234yf (Tetrafluorpropen)	- 30	1,0	3,2	10,5	ja	ja	4

<sup>18</sup> **GWP:** Global Warming Potential.

Zunächst aus ökonomischen, heute aber auch aus ökologischen Gründen sind kältetechnische Anlagen grundsätzlich als **geschlossene** Systeme auszuführen. Dies bedeutet, dass eine verdampfte Flüssigkeit im Kreislauf geführt und daher immer wieder kondensiert werden muss, damit das Kältemittel nicht in die Umgebung abgegeben wird. Des Weiteren ist zu fordern, dass Kältemittel im betrachteten Temperaturbereich chemisch möglichst inaktiv, also sehr reaktionsträge (inert) sind. Dies schließt ein, dass Kältemittel und ihre Zersetzungsprodukte auch bei höheren Temperaturen, wie sie z. B. im Brandfall auftreten würden, möglichst ungiftig sein sollten. Heute kommt hinzu, dass auch die der kältetechnischen Anwendung vor- und nachgelagerten Prozessschritte der Herstellung, des Rezyklierens und der Entsorgung von Kältemitteln unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit möglichst umweltfreundlich dargestellt werden können.

### **Kältemittel R-12 (Dichlordifluormethan)**

Bis zum Ende der 80-er Jahre des 20. Jahrhunderts hatte sich als Kältemittel Dichlordifluormethan  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  (R-12) durchgesetzt, als typischer Vertreter der fluorierten chlorierten Kohlenwasserstoffe (FCKW). R-12 erfüllt die oben genannten Bedingungen, insbesondere verdampft es bei einem Druck von 0,1 MPa (1 bar) bereits bei einer Temperatur von  $-30\text{ }^\circ\text{C}$ . Darüber hinaus ist es in einem weiten Temperaturbereich chemisch inert, ungiftig und nicht brennbar.

Erst seit Beginn der 90-er Jahre des 20. Jahrhunderts ist gesichert bekannt, dass die Stoffgruppe der FCKW im Allgemeinen und R-12 im Besonderen für den Abbau der Ozonschicht in der oberen Atmosphäre verantwortlich sind. Der Mechanismus beginnt mit der Zerlegung der freigesetzten R-12-Moleküle durch die massive UV-Strahlung in der Stratosphäre. Dabei entstehen Chlor- und Fluorradikale. Speziell die Chlorradikale bauen Ozon zu molekularem Sauerstoff ab. Durch nachfolgende Reaktionsschritte werden die Chlorradikale wieder frei gesetzt und stehen dadurch erneut für die Zerstörung weiterer Ozonmoleküle zur Verfügung. Die Diffusion der FCKW in die obere Atmosphäre und der nachfolgende Abbau dieser Substanzen bis zur Unschädlichkeit dauern sehr lange. Daher werden auch die zurückliegenden FCKW-Emissionen noch bis zu 100 Jahre lang in der oberen Atmosphäre wirksam sein. Seit 1995 ist die Herstellung von FCKW - speziell von R-12 - aus diesem Grund in den Industrieländern verboten. Gleichwohl laufen noch viele ältere Anlagen mit diesem Kältemittel, auch im Fahrzeugbereich in mobilen Anlagen.

### **Kältemittel R-290 (Propan) und R-600a (Isobutan)**

Die kältetechnische Industrie ist bereits seit den 1990er Jahren zur Verwendung FCKW-freier Kältemittel übergegangen. Altgeräte, die insbesondere bei lebensmitteltechnischen Anlagen in den Bereichen Handel, Gewerbe und Produktion nach wie vor mit R-12 arbeiten, werden nur nach und nach durch FCKW-freie Neugeräte ersetzt, weil das Kältemittel nicht einfach ausgetauscht werden kann, ohne die mechanischen Komponenten dieser Anlagen anzupassen.

Die meisten Kühl- und Gefriergeräte für private Haushalte verwenden heute als Kältemittel Isobutan (R-600a). In größeren, gewerblichen Anlagen werden auch Gemische verschiedener Kohlenwasserstoffe wie z. B. R-404a als Kältemittel eingesetzt. Diese Stoffe verdampfen ebenfalls bei Temperaturen unterhalb der erforderlichen Gefrier- oder Kühlraumtemperaturen (Stoffwerte siehe Tab. 2.9).

Für die Verwendung der genannten Paraffine im Unterschied zu anderen Kohlenwasserstoffen spricht deren vergleichsweise hohe Stabilität, die zu langen Lebensdauern der zugehörigen Kältekreisläufe beiträgt. Denn die Kältemittel müssen im Dauerbetrieb komprimiert und entspannt werden, wobei Drücke bis zu 1,5 MPa (= 15 bar) und Kondensationstemperaturen von bis zu 100 °C auftreten können.

Die Kohlenwasserstoffe haben allerdings den Nachteil, selbst feuer- und explosionsgefährdet zu sein. Das Inventar an Kältemittel ist in Haushaltsgeräten allerdings sehr gering (ca. 50 bis 100 g). Für den Fall einer Leckage wird sich das austretende Paraffin sehr schnell verdünnen, wobei die Explosionsgrenze weit unterschritten wird. Bei größeren gewerblichen Anlagen ist an entsprechende Luftwechselzahlen im Aufstellungsraum, die Odorierung des Kältemittels zur automatischen Warnung durch entsprechende Sensoren sowie vorbeugende Brandsicherheitsmaßnahmen zu denken.

Als Vorteil im Vergleich zu FCKW beim Brandfall ist zu sehen, dass hier keine thermisch bedingten Emissionen aus der Zersetzung des Kältemittels wie z. B. Salzsäure (HCl), Flußsäure (HF), Phosgen ( $\text{COCl}_2$ ) oder sogar chlorierte Dibenzodioxine (z. B. 2,3,7,8-TCDD<sup>19</sup>) auftreten können.

Zusätzlich ist jedoch anzumerken, dass auch Butan oder Propan bei einer Abgabe in die Umgebung nicht ohne Einfluss auf die Thermodynamik und Chemie der Atmosphäre bleiben. Normalparaffine, allen voran das Methan, nehmen nämlich als wärmestrahlungsaktive Moleküle am sogenannten Treibhauseffekt der Erdatmosphäre teil. Dies bedeutet, dass große Emissionen solcher Gase vermieden werden müssen, wenn nicht der Treibhauseffekt zusätzlich angeheizt werden soll. Allerdings unterscheiden sich die Paraffine hinsichtlich ihrer Treibhauswirkung von den FCKW, weil sie ein erheblich niedrigeres Global Warming Potential (GWP) aufweisen (siehe Tab. 2.9).

---

<sup>19</sup> **TCDD:** Tetrachlordibenzodioxin entsteht im Temperaturbereich zwischen ca. 400 und 1.200 °C bei unvollständiger Verbrennung aus Aromaten und Chlorradikalen. Diese Substanz gehört als eines von zahlreichen Isomeren zur Stoffklasse der polychlorierten Dibenzodioxine (PCDD) mit hoher teratogener und cancerogener Wirkung (Stichwort: Seveso-Gift).



## Kältemittel R-717 (Ammoniak)

Ein weiteres FCKW-freies Kältemittel, das bereits seit ca. 150 Jahren von der Lebensmittelindustrie und der Transportlogistik (Lagerung) in Kälteanlagen genutzt wird, ist Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ). Dieses Gas gilt wegen seines natürlichen Vorkommens als „natürliches“ Kältemittel, obwohl es für die großtechnische Verwendung synthetisiert wird. Ammoniak gilt als sehr umweltfreundlich, da es weder Ozon zersetzt ( $\text{ODP} = 0$ ) noch eine nennenswerte Treibhauswirkung aufweist ( $\text{GWP} < 1$ ). Zudem gilt Ammoniak als preisgünstig und energieeffizient. Allerdings kann Ammoniak für den Menschen toxisch, in hohen Konzentrationen in der Atemluft sogar tödlich sein. Aber schon geringste Konzentrationen von  $\text{NH}_3$  in der Luft sind wegen des stechenden Geruchs deutlich wahrnehmbar und schützen so vor Schädigung. Ammoniak ist sowohl im Kompressorverfahren als auch in Absorptionskälteanlagen (siehe Seite 56) als Kältemittel einsetzbar. Für Anlagen mit diesem Kältemittel gelten besondere Sicherheitsvorschriften.

## Kompressorverfahren am Beispiel von R-134a (Tetrafluorethan)

In gewerblichen Kälteanlagen wird noch sehr häufig das Kältemittel R-134a 1,1,1,2-Tetrafluorethan ( $\text{CH}_2\text{FCF}_3$ ) eingesetzt. Die geltende EU-Verordnung 517/2014 (F-Gase Verordnung) schreibt bis zum Jahr 2030 eine schrittweise Reduktion von fluorierten Treibhausgasen mit hohem Treibhauspotenzial und eine Umstellung auf umweltfreundlichere Kältemittel vor. R-134a ist ein wirksames Treibhausgas ( $\text{GWP} = 1.430$ ). Derzeit erfolgt deshalb die Substitution von R-134a je nach Kälteleistung durch R-290, R-600a oder vergleichbare Kältemittel.

Im Folgenden wird der Kältekreislauf mit Kompressorantrieb am Beispiel des Kältemittels R-134a erläutert. Der prinzipielle Aufbau ist dabei unabhängig vom benutzten Kältemittel. Die Realisierung kältetechnischer Verfahren als Kreislaufprozess im Kompressorverfahren beruht immer auf vier Schritten:

- **Schritt 1** besteht in der Verdampfung der Kältemittelflüssigkeit bei niedrigem Druck und der zugehörigen niedrigen Siedetemperatur. Eine siedende Flüssigkeit verdampft bei Energiezufuhr und konstanter Temperatur. Es handelt sich daher um eine isotherme Zustandsänderung. Die aus dem Kühlraum über Wärmeübertragung dem Verdampfer zugeführte Energie wird vollständig in Verdampfungsenthalpie umgesetzt. Wärme kann aber zum Verdampfer nur übertragen werden, wenn eine Temperaturdifferenz vorhanden ist. Daraus ergibt sich, dass die Siedetemperatur des Kältemittels unterhalb der Kühlraumtemperatur liegen muss. Dem Verdampfer wird im kontinuierlichen Betrieb flüssiges Kältemittel zugeführt, während gasförmiges Kältemittel (synonym: Kältemitteldampf) abgesaugt wird.

- **Schritt 2** besteht in der Absaugung des Kältemitteldampfs aus dem Verdampfer und dessen Verdichtung (synonym: Kompression) auf einen höheren Druck. Dazu ist im Kältemittelkreislauf ein Kompressor installiert, der dem ganzen Verfahren seinen Namen gibt: das **Kompressorverfahren**. Der Kompressor wird mechanisch von einem Elektro- oder Verbrennungsmotor angetrieben. Bei der Kompression steigt gleichzeitig durch Dissipation (Innere Reibung) die Temperatur des Kältemitteldampfs auf Werte oberhalb der Umgebungstemperatur.
- Diese hohe Temperatur erlaubt in **Schritt 3** die Kondensation des Kältemittels, weil jetzt Energie vom Kältemittel an die Umgebung abgeführt werden kann. Dies ist nur möglich, weil die Kondensationstemperatur bei Hochdruck über der Umgebungstemperatur liegt. Das treibende Potential für den Energieaustausch mit der Umgebung ist die Differenz zwischen Kondensations- und Umgebungstemperatur. Am Ausgang des Kondensators liegt flüssiges Kältemittel unter hohem Druck vor. Die Kondensation vom reinen Gas zur reinen Flüssigkeit läuft also ebenfalls isotherm (und auch isobar), unter Abgabe der Kondensationsenthalpie an die Umgebung.
- In **Schritt 4** wird der hohe Druck des flüssigen Kältemittels auf den niedrigen Druck im Verdampfer reduziert. Dies geschieht im sogenannten Expansionsorgan, das als Kapillare oder Expansionsventil ausgeführt ist. Hier wird der hohe Druck durch den Strömungswiderstand der Kapillare (Drossel) oder des Expansionsventils reduziert, wobei gleichzeitig Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Aufgrund der sinkenden Temperatur verdampft bereits wieder ein Teil des Kältemittels, so dass dem Verdampfer keine reine Flüssigkeit, sondern ein Gemisch aus flüssigem und gasförmigem Kältemittel zugeführt wird. Der Kältemittelkreislauf ist damit geschlossen.

Das Verfahren arbeitet nur deshalb im Kreislauf, weil dem Kompressor von außen Endenergie zugeführt wird, damit Kältemitteldampf aus dem Verdampfer abgesaugt und auf Hochdruck verdichtet werden kann. Bei still stehendem Kompressor gleichen sich nach kurzer Zeit alle Temperaturen und Drücke des Systems aus. Erst wenn dem Kompressor wieder Arbeit zugeführt wird, kann das thermodynamische Ungleichgewicht des Kältekreislaufs wieder erreicht und aufrechterhalten werden.

Den vier Schritten sind apparatetechnisch folgende Aggregate zugeordnet:

- Schritt 1: Verdampfer (Wärmetauscher im Kühlraum)
- Schritt 2: Kompressor (mit Motorantrieb außerhalb des Kühlraums)
- Schritt 3: Kondensator (Wärmetauscher außerhalb des Kühlraums)
- Schritt 4: Expansionsventil (Drosselorgan außerhalb des Kühlraums)

Die vier dargelegten Schritte sind in Abb. 2.19 und Tab. 2.10 übersichtlich zusammengefasst.

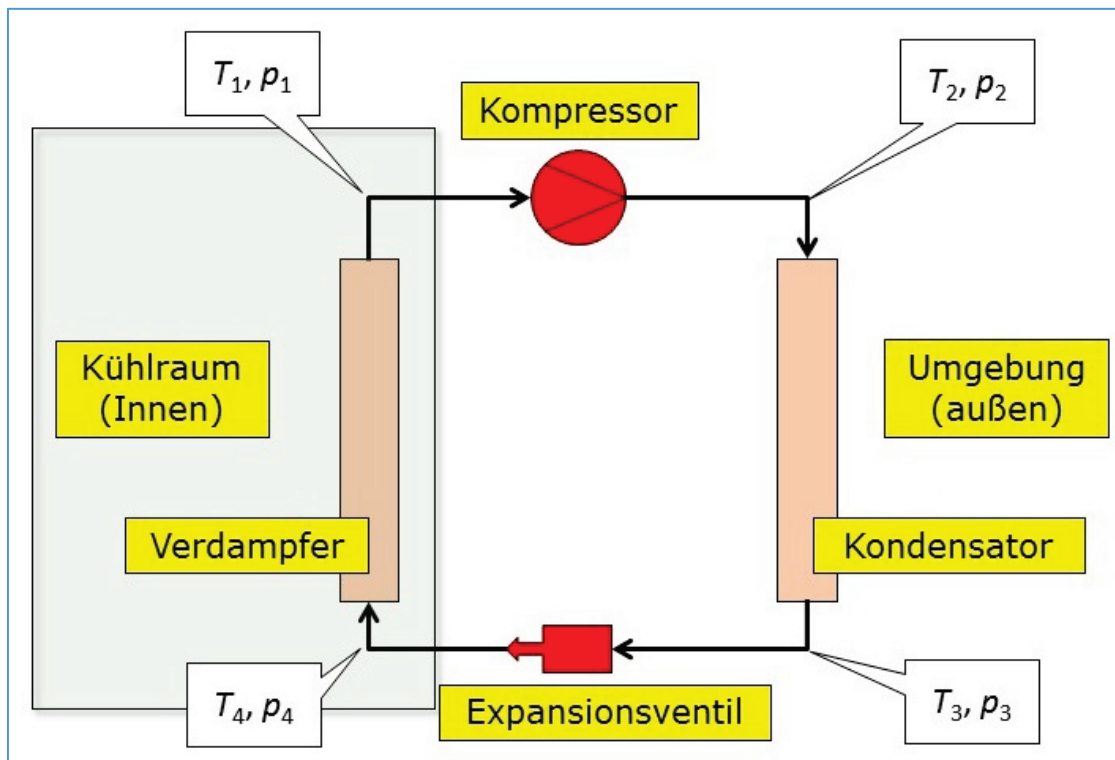


Abb. 2.19: Prinzipbild des Kältekreislaufs in vier Schritten (© E. Schlich)

Tab. 2.10: Schritte im Kältemittelkreislauf mit idealisierten Zustandsänderungen

Schritt	Bezeichnung	Aggregatzustand	Druck	Zustandsänderung
1	Verdampfung	flüssig $\Rightarrow$ gasförmig	niedrig	isotherm <sup>20</sup> und isobar <sup>21</sup>
2	Kompression	gasförmig	ansteigend	isentrop <sup>22</sup>
3	Kondensation	gasförmig $\Rightarrow$ flüssig	hoch	isotherm und isobar
4	Expansion	flüssig	abfallend	isenthalp <sup>23</sup>

Tab. 2.11 zeigt die zugehörigen Zustandsgrößen und Benennungen.

Tab. 2.11: Temperaturen und Drücke nach dem jeweiligen Schritt im Kältemittelkreislauf

Schritt	Zustandsänderung, Verfahren	Temperatur	Druck
1	Verdampfung bei niedrigem Druck	$T_1$	$p_1$
2	Kompression auf hohem Druck	$T_2$	$p_2$
3	Kondensation bei hohem Druck	$T_3$	$p_3$
4	Expansion auf niedrigen Druck	$T_4$	$p_4$

<sup>20</sup> Isotherm: Zustandsänderung bei zeitlich konstanter Temperatur ( $dT/dt = 0$ ).

<sup>21</sup> Isobar: Zustandsänderung bei zeitlich konstantem Druck ( $dp/dt = 0$ ).

<sup>22</sup> Isentrop: Zustandsänderung bei zeitlich konstanter Entropie  $S$  ( $dS/dt = 0$ ).

<sup>23</sup> Isenthalp: Zustandsänderung bei zeitlich konstanter Enthalpie  $H$  ( $dH/dt = 0$ ).

Die Zustandsänderungen des Kältemittels im Kreisprozess können in verschiedenen Diagrammen dargestellt werden. Zum thermodynamischen Verständnis und insbesondere zur Ermittlung von Leistungs- und Arbeitsziffern (siehe unten) sind Druck-Enthalpie-Diagramme des Kältemittels von Vorteil, mit einer logarithmierten Darstellung des Drucks als  $\log p = f(h)$ . Dieses Diagramm heißt vereinfacht auch  $\log p-h$  Diagramm.

Grundsätzlich kann jeder reine Stoff - ob Wasser, Sauerstoff oder Kältemittel - in einem solchen Diagramm dargestellt werden. Die thermodynamischen Zustandsgrößen Druck, Temperatur und Volumen definieren eindeutig jeden möglichen Zustand des reinen Stoffs. Dabei können mehrere Phasengebiete deutlich voneinander abgegrenzt werden: das Gebiet reiner Flüssigkeit, das Nassdampfgebiet und das Gebiet des reinen Dampfes.

Das Gebiet reiner Flüssigkeit wird vom Nassdampfgebiet durch die Siedelinie, das Nassdampfgebiet vom Gebiet reinen Dampfes durch die Kondensationslinie abgegrenzt. Für jeden reinen Stoff existiert eine Tafel der Zustandsgrößen und das zugehörige  $\log p-h$  Diagramm. Darin sind zusätzlich die Isothermen, die Isobaren, die Isenthalpen und die Isentropen des Kältemittels erkennbar. Abb. 2.20 zeigt das  $\log p-h$ -Diagramm des Kältemittels R134a, mit Siede- und Kondensationslinie sowie den dadurch klar abgetrennten Aggregatzuständen.

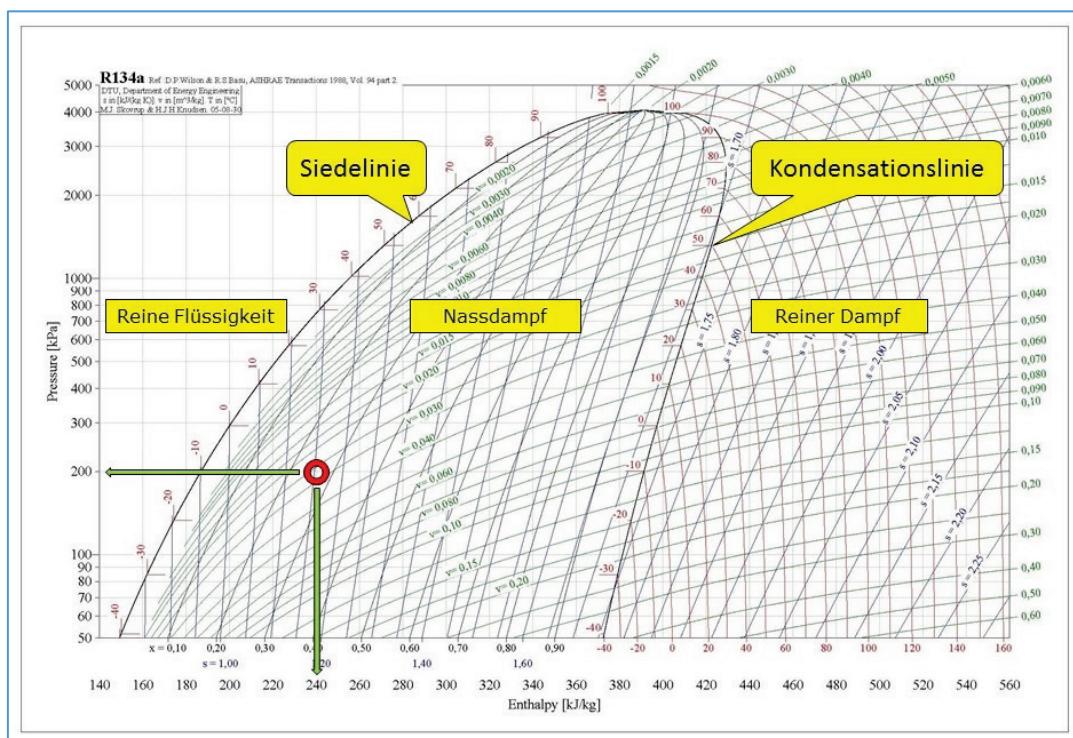


Abb. 2.20: Log  $p-h$  Diagramm für R-134a mit Arbeitspunkt (rot) als Beispiel

Auf der x-Achse des  $\log p-h$ -Diagramms ist die spezifische Enthalpie  $h$  in kJ/kg, auf der y-Achse der logarithmierte Druck  $p$  in kPa abgetragen. Eine vertikale Linie im Diagramm ist daher eine Linie konstanter Enthalpie (Isenthalpe), eine horizontale Linie eine Linie konstanten Drucks (Isobare). Isothermen sind in Rot und Isentropen in Blau eingezeichnet.



Das Gebiet reiner Flüssigkeit findet sich links der Siedelinie, das Gebiet reinen Dampfes rechts der Kondensationslinie. Die Siedelinie links und die Kondensationslinie rechts umschließen das Nassdampfgebiet. Im Nassdampfgebiet verlaufen die Isothermen wie die Isobaren horizontal, da Verdampfung und Kondensation bei konstantem Druck auch bei konstanter Temperatur stattfinden.

Der große Vorteil des  $\log p-h$  Diagramms besteht darin, dass die Enthalpie und der Druck jedes beliebigen Arbeitspunktes des Kältemittels als  $x$ ,  $y$ -Koordinaten abgelesen werden können. Für den rot markierten Arbeitspunkt in Abb. 2.20 sind dies die folgenden Daten, verdeutlicht durch die grünen Pfeile:

- Spezifische Enthalpie  $h = 240 \text{ kJ/kg}$
- Druck  $p = 200 \text{ kPa}$  (= 2 bar).

Gleichzeitig kann die Temperatur des Kältemittels mit  $T = -10 \text{ °C}$  abgelesen werden. Mit dieser Temperatur des verdampfenden Kältemittels kann ein Kühlraum der Temperatur  $T_K = +5 \text{ °C}$  realisiert werden. Die treibende Temperaturdifferenz, die zur Abfuhr von Wärme aus dem Kühlraum erforderlich ist, beträgt dann  $\Delta T = 15 \text{ K}$ . Abb. 2.21 zeigt nun den vollständigen Kältemittelkreislauf in den oben angesprochenen vier Schritten.

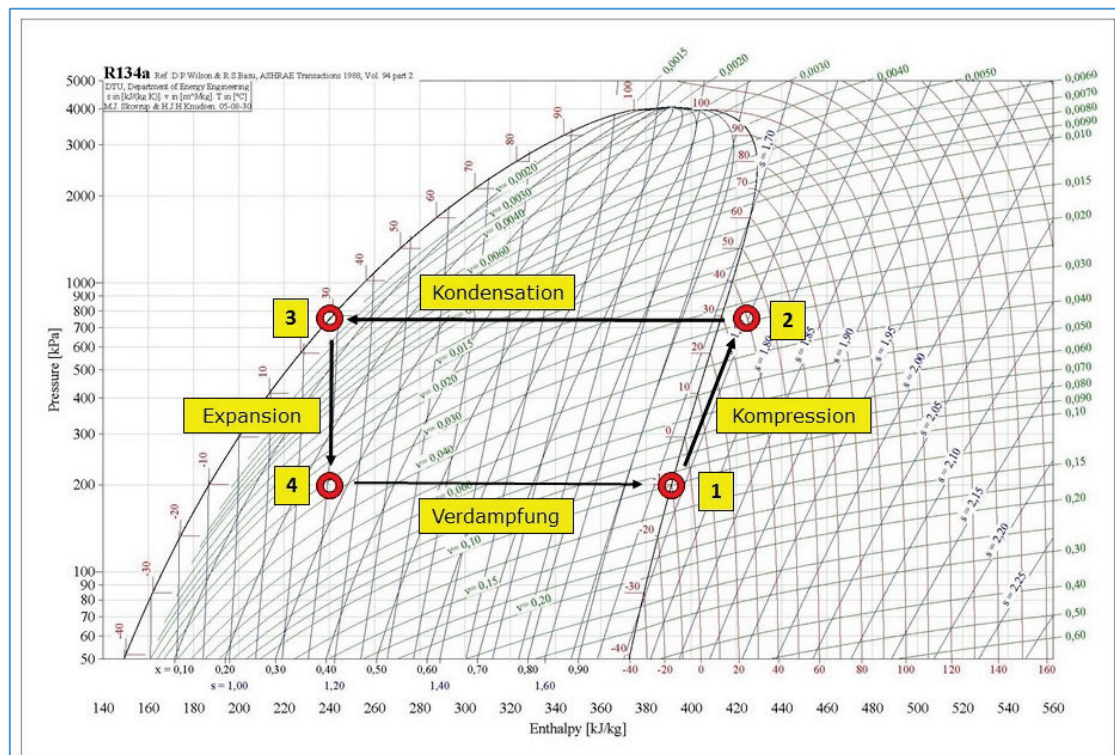


Abb. 2.21: Der Kältekreislauf im  $\log p-h$  Diagramm

Aus dem Diagramm in Abb. 2.21 können folgende Daten für jeden Arbeitspunkt des Kompressorverfahrens mit R-134a entnommen werden (Tab. 2.12).

Tab. 2.12: Zustand, Temperatur, Druck und Enthalpie für die vier Arbeitspunkte aus Abb. 2.21

	Zustand	Temperatur	Druck	Enthalpie
1	Sattdampf	$T_1 = -10 \text{ °C}$	$p_1 = 200 \text{ kPa}$	$h_1 = 390 \text{ kJ/kg}$
2	Überhitzter Dampf	$T_2 = +30 \text{ °C}$	$p_2 = 750 \text{ kPa}$	$h_2 = 430 \text{ kJ/kg}$
3	Flüssigkeit	$T_3 = +30 \text{ °C}$	$p_3 = 750 \text{ kPa}$	$h_3 = 240 \text{ kJ/kg}$
4	Nassdampf	$T_4 = -10 \text{ °C}$	$p_4 = 200 \text{ kPa}$	$h_4 = 240 \text{ kJ/kg}$

Die Daten zeigen zusätzlich folgende Enthalpiedifferenzen der einzelnen Schritte:

- für die Kompression:  $\Delta h = h_2 - h_1 = +40 \text{ kJ/kg}$ ,
- für die Kondensation:  $\Delta h = h_3 - h_2 = -190 \text{ kJ/kg}$  und
- für die Verdampfung:  $\Delta h = h_1 - h_4 = +150 \text{ kJ/kg}$ .

### Leistungsbilanz und Leistungsziffer der Kälteanlage

Im stationären Fall, der bei kontinuierlich laufendem Kompressor nach wenigen Minuten eintritt, sind sämtliche Zustandsgrößen der vier Arbeitspunkte konstant. Für diesen Fall ändert sich auch die Systemenergie nicht, denn die Energiebilanz ist insgesamt ausgeglichen. Die Summe aller Enthalpiedifferenzen muss daher unter Verwendung der richtigen Vorzeichen (+ für zugeführte und - für abgeführte Leistung) Null ergeben (siehe Tab. 2.12).

Aus anwendungstechnischer Sicht besteht die Kälteleistung einer Kühlanlage aus dem Nutzwärmestrom, der an den Verdampfer übertragen wird. Zur Berechnung des Nutzwärmestroms wird die Verdampfungsenthalpie mit dem Massenstrom des verdampfenden Kältemittels multipliziert (siehe Gl. 18).

$$\dot{Q}_{\text{Nutz}} = \dot{m}_{\text{KM}} \times \Delta h_{\text{V}} \quad (\text{Gl. 18})$$

Hier würde z. B. ein Massenstrom von 1 g/s des Kältemittels R-134a, das im Verdampfer mit der spezifischen Enthalpie von  $\Delta h_{\text{V}} = 150 \text{ kJ/kg}$  verdampft, eine Kühlleistung von 0,150 kW erzeugen. Diese wird mit dem Kältemitteldampf aus dem Kühlraum nach außen abgeführt. Der Kondensator gibt dann einen kontinuierlichen Wärmestrom von 0,190 kW an die Umgebung ab. Dies entspricht der Summe aus dem Nutzwärmestrom des Verdampfers und der mechanischen Leistung der Kompression.

Diese Daten, die für einen kontinuierlichen Kältemittelmassenstrom von 1 g/s gelten, sind in Abb. 2.22 visualisiert.



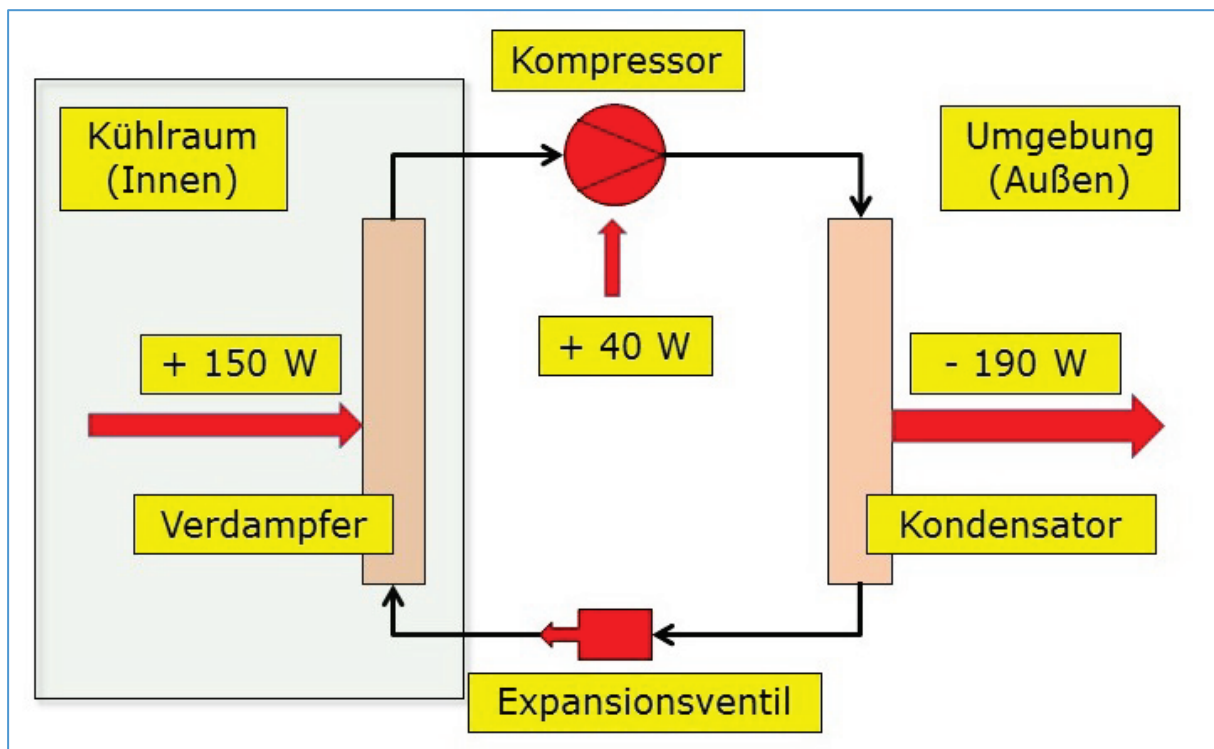


Abb. 2.22: Leistungsbilanz für einen Kältemittelmassenstrom von  $1\text{ g/s}$  (© E. Schlich)

Die theoretische Leistungsziffer  $\varepsilon_K$  einer solchen Anlage berechnet sich aus dem Verhältnis von Nutzen zu Aufwand. Als Nutzen einer kältetechnischen Anlage wird im Allgemeinen der dem Verdampfer zugeführte Wärmestrom verstanden. Der Aufwand besteht in der Zufuhr der mechanischen Leistung zum Kompressor.

Die theoretische Leistungsziffer im vorliegenden Beispiel beträgt also

$$\varepsilon_K = 150\text{ W} / 40\text{ W} = 3,75.$$

Dabei handelt es sich um einen theoretischen Wert, weil zum einen die aus Abb. 2.22 entnommenen Daten aus idealisiert angenommenen Zustandsänderungen resultieren<sup>24</sup>. Zum anderen wird die Antriebsleistung des Kompressors über einen Elektro- oder Verbrennungsmotor nicht berücksichtigt, sondern nur die mechanische Leistung der Kompression. Die Antriebsleistung ist definitiv höher, so dass die Leistungsziffer real kleiner wird.

Kältetechnische Anlagen arbeiten in der Regel nicht stationär und kontinuierlich, sondern werden häufiger an- und ausgeschaltet, um ein bestimmtes, vorgegebenes Temperaturniveau im Kühlraum zu halten. Die zugehörige Regelungstechnik wird im einfachsten Fall mit Hilfe von sogenannten Bimetallreglern vorgenommen.

<sup>24</sup> Anmerkung: Real ist die Kompression nicht isentrop, sondern polytrop, da die Entropie bei der Kompression zunimmt. Deshalb liegt der Arbeitspunkt 2 immer etwas weiter rechts im log p-h-Diagramm (Überhitzung). Zudem liegt der Arbeitspunkt 3 immer im Gebiet reiner Flüssigkeit, also nicht genau auf der Siedelinie und weiter links im log p-h-Diagramm (Unterkühlung). Diese thermodynamischen Details werden hier vernachlässigt, da es lediglich um die prinzipielle Erläuterung des Kompressorverfahrens und des zugehörigen Kältemittelkreislaufs geht.

Seitens des Nutzers der kältetechnischen Anlage kann die Kühl- oder Gefriertemperatur in bestimmten Grenzen vorgewählt werden.

### **Energiebilanz und Arbeitsziffer der Kälteanlage**

Zur Beurteilung der Wirkung einer kältetechnischen Anlage empfiehlt sich jedoch eher die Erstellung einer Energiebilanz unter Berücksichtigung der beiden Übertragungsgrößen Wärme und Arbeit statt der Verwendung der Leistungsbilanz. Da die verrichtete Arbeit sich aus dem Integral der Leistung über die Betriebszeit und die übertragene Wärme sich aus dem Integral des Wärmestroms über die Zeit ergeben, empfiehlt sich messtechnisch, eine solche Anlage über einen längeren Zeitraum zu betreiben, wobei die Umgebungsbedingungen konstant gehalten werden müssen. Die Hersteller von Haushaltsgeräten verfügen demgemäß über große, klimatisierte Prüfräume, in denen die Wärmeübertragung und die hierzu benötigte Arbeit messtechnisch erfasst werden.

Im einfachsten Fall wird die zum Betrieb einer Kälteanlage erforderliche Arbeit mit Hilfe eines Energiemessgeräts (Stromzähler) über einen längeren Zeitraum gemessen. Die dem Verdampfer zugeführte Wärme ist messtechnisch direkt nicht zugänglich. Hier sind Messungen in Prüfräumen mit standardisierten Bedingungen erforderlich, die den Kältemittelkreislauf beschreiben. Aus dem Verhältnis der zugeführten Wärme und der hierfür erforderlichen zugeführten Arbeit ergibt sich die sogenannte Arbeitsziffer  $\beta_K$  einer Kälteanlage. Auch hierbei handelt es sich um eine dimensionslose Ziffer, die bestimmte Energieterme des zu beurteilenden Prozesses ins Verhältnis setzt.

In beiden Fällen - Leistungs- bzw. Arbeitsziffer - ist darauf zu achten, dass immer physikalisch gleiche Größen ins Verhältnis zueinander gesetzt werden, damit das Ergebnis dimensionslos wird. Hierbei sagt die Arbeitsziffer sehr viel mehr über die Güte eines Prozesses aus als die Leistungsziffer, weil die Arbeitsziffer dem tatsächlichen, intermittierenden Betrieb von Kälteanlagen entspricht. Darüber hinaus liegt der Arbeitsziffer ein längerer Beobachtungszeitraum - in der Regel ein Betriebsjahr - zugrunde. Technische Kälteanlagen wie etwa Kühl- und Gefriergeräte im Haushalt erreichen kältetechnische Arbeitsziffern im Bereich von 0,6 bis 0,8.

### **Kompressorverfahren als Wärmepumpe**

Das technische Prinzip des Kompressorverfahrens kann ebenso gut zur Erzeugung von Nutzwärme genutzt werden. Eine solche Anlage nennt sich Wärmepumpe. Die Nutzwärme, die dann z. B. zur Raumheizung oder Warmwasserbereitung genutzt werden kann, wird am Kondensator der Anlage, also auf der Hochdruckseite, entnommen. Der Verdampfer befindet sich in der Umgebung und kühlt Außenluft oder Grundwasser.

Das Prinzip einer solchen Anlage, hier mit denselben Zustandsdaten des Kältemittels R-134a aus Abb. 2.21, zeigt Abb. 2.23. Der Nutzwärmestrom für den Kältemittelmassenstrom von 1 g/s beträgt nun 190 W, die aus 150 W Verdampferleistung und 40 W Kompressionsleistung entstehen.

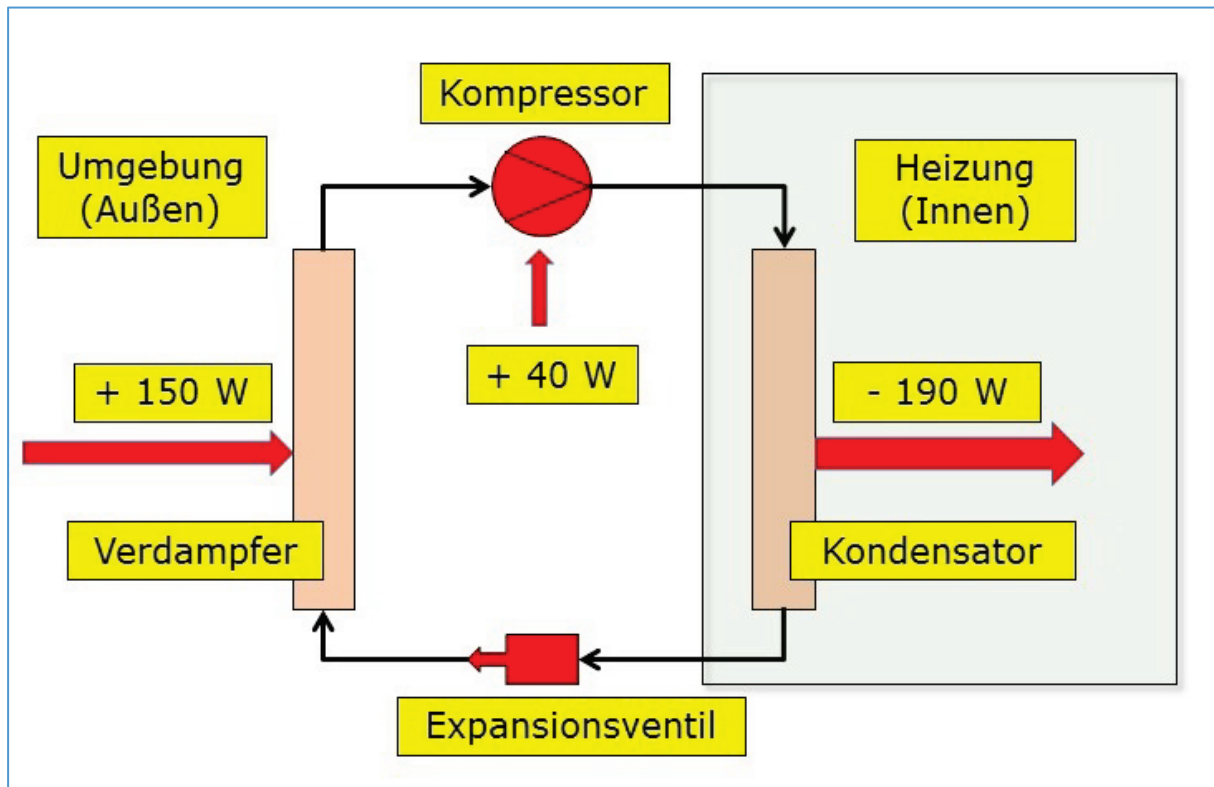


Abb. 2.23: Wärmepumpe mit einem Kältemittelmassenstrom von 1 g/s (© E. Schlich)

Die im Beispiel angegebenen Leistungsdaten gehören zum kontinuierlichen Kältemittelmassenstrom von 1 g/s im Kreislauf und können linear extrapoliert werden. So würde ein Massenstrom von 1 kg/s eine theoretische Nutzwärmeleistung von 190 kW erzeugen, ausreichend zur Beheizung von ca. 2.000 - 3.000 m<sup>2</sup> Raumfläche.

Die theoretische Leistungsziffer für die Wärmepumpe errechnet sich aus dem Verhältnis von Nutzen zu Aufwand, beträgt also im vorliegenden Beispiel

$$\varepsilon_w = 190 \text{ W} / 40 \text{ W} = 4,75.$$

Aussagekräftiger als dieser theoretische Wert ist auch hier die Arbeitsziffer, die aus der messtechnischen Betrachtung eines längeren Zeitraums der Wärmepumpe gewonnen werden kann. Gemäß betrieblicher Erfahrungen mit Wärmepumpen ist von realistischen Arbeitsziffern in der Größenordnung 1,6 - 1,8 auszugehen.

Technisch reizvoll, aber regelungstechnisch anspruchsvoll sind Kompressorverfahren, die sowohl die Niederdruckseite (Verdampfer) für die Erzeugung von Kälte als auch die Hochdruckseite (Kondensator) für die Erzeugung von Wärme nutzen.



Das wäre z. B. für Betriebe wirtschaftlich interessant, die große Kühl- und Gefrierräume nutzen und die dort abgeführte Energie zur Bereitstellung von Warmwasser für die Produktion oder die Betriebs- oder Personalhygiene einsetzen. Für eine solch effiziente Anwendung würde sich die Regelung nach der geforderten Kühl- oder Gefriertemperatur richten, wobei die anfallende Abwärme am Kondensator in einem Warmwasserbehälter gespeichert werden kann.

### Absorptionskälteanlagen

Das grundlegende Prinzip einer Absorptionskälteanlage besteht darin, dass ein flüssiges Lösungsmittel (LM) bei niedrigen Temperaturen ein gasförmiges Kältemittel (KM) **absorbiert** und bei hohen Temperaturen wieder **desorbiert**. Daraus folgt, dass in der Kälteanlage zwei Stoffe zirkulieren: das Lösungsmittel und das Kältemittel. Industrielle Anwendung in der Lebensmitteltechnik finden vor allem das Stoffpaar Wasser ( $H_2O$ ) als Lösungs- mit Ammoniak ( $NH_3$ ) als Kältemittel sowie das Stoffpaar Lithiumbromid ( $LiBr$ ) als Lösungs- mit Wasser ( $H_2O$ ) als Kältemittel.

Der Antrieb des Kältekreislaufs erfolgt in einem von außen beheizten Desorber (auch Austreiber genannt), der das absorbierte Kältemittel aus dem Lösungsmittel unter Zufuhr der Desorptionsenthalpie desorbiert (austreibt). Danach strömt das gasförmige Kältemittel in den Kondensator und wird unter Wärmeabgabe an die Umgebung verflüssigt. Im Kühlraum befindet sich der Verdampfer, in dem das flüssige Kältemittel unter Aufnahme von Wärme aus dem Kühlraum verdampft. Im nachgeschalteten Absorber wird das gasförmige Kältemittel vom Lösungsmittel wieder absorbiert, unter Abgabe der Absorptionsenthalpie in die Umgebung. Das Lösungs-/Kältemittelgemisch wird zum Desorber gepumpt und der Kreislauf beginnt von vorne. Abb. 2.24 zeigt die einzelnen Bauteile und den zugehörigen Kältemittel- und Lösungsmittelkreislauf.

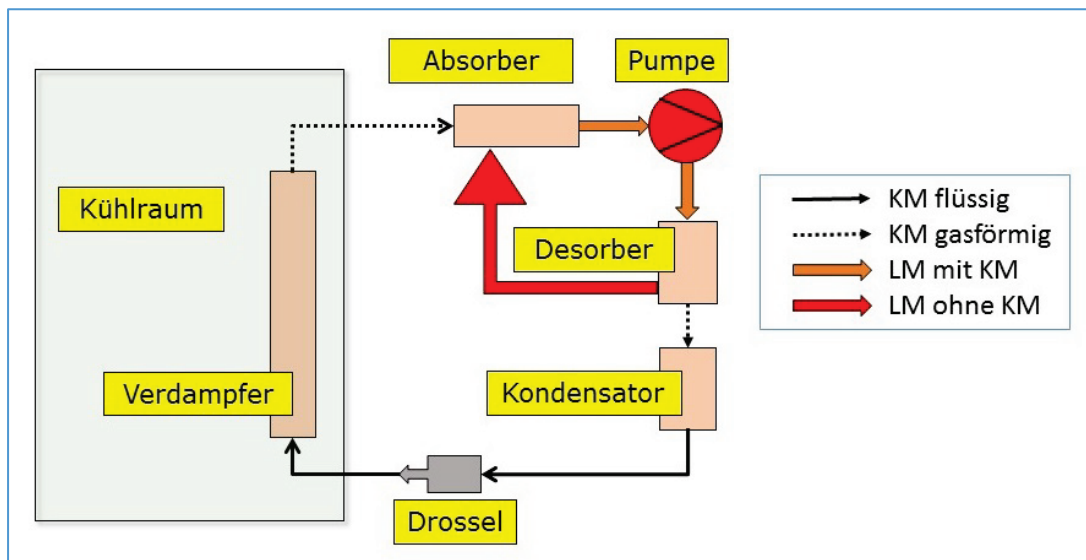


Abb. 2.24: Fließschema der Absorptionskälteanlage (KM: Kältemittel, LM: Lösemittel) (© E. Schlich)

Großanlagen enthalten eine mechanisch angetriebene Pumpe im Kreislauf, um das Lösungs-/Kältemittelgemisch zum Desorber zu fördern (siehe Abb. 2.24). Kleinstanlagen hingegen nutzen Wasserstoff als sogenanntes Hilfsgas, mit dessen Auftrieb das Lösungs-/Kältemittelgemisch zum Desorber transportiert werden kann. Der Antrieb erfolgt hier also ganz ohne mechanisch bewegte Teile, sondern einzig durch die Beheizung des Austreibers. Insofern sind diese Anlagen praktisch geräuschlos, was sie für den Einsatz in Hotelzimmern und Wohnmobilen qualifiziert.

Unabhängig davon kann eine beliebige Energiequelle für die Beheizung des Desorbers genutzt werden, z. B. ein Gasbrenner oder eine elektrische Heizpatrone. Auch bivalente Antriebe mit mehreren Heizquellen sind möglich. So kann in größeren Betrieben z. B. die Abwärme von Spül- oder Waschmaschinen umweltfreundlich dazu genutzt werden, die im selben Betrieb benötigte Kühlleistung zu erbringen.

Absorptionsverfahren arbeiten mit Abwärmertemperaturen von ca. 80 bis 160 °C und können je nach Temperaturniveau der Abwärme und dem eingesetzten Arbeitsstoffpaar Kühlttemperaturen von 5 °C bis unter 0 °C erreichen. Absorptionskälteanlagen sind sehr langlebig und haben ein gutes Teillastverhalten. Nachteilig sind der hohe Platzbedarf und die geringe Dynamik. Die Effizienz von Absorptionskältemaschinen ist zudem im Vergleich zum Kompressorverfahren deutlich schlechter, kann jedoch durch einen mehrstufigen Absorptionsprozess gesteigert werden.

Als Maßzahl für die Effizienz von Absorptionskälteanlagen dient das Wärmeverhältnis  $\zeta$ , definiert als Verhältnis der am Verdampfer erzeugten Kälte<sup>25</sup> zur zugeführten Wärmeenergie. Diese Kenngröße ist vergleichbar mit der Arbeitsziffer des Kompressorverfahrens. Das Wärmeverhältnis erreicht bei Absorptionskälteanlagen üblicherweise Werte zwischen 0,3 und 1,2. So können also auch Werte deutlich unter 1 auftreten, wobei weniger Kälte erhalten als Wärme eingesetzt wird.

<sup>25</sup> Diese entspricht dem Produkt aus verdampftem Kältemittel mit dessen Verdampfungsenthalpie.





© C. Rondeau auf pixabay



## 2.4 Trinkwasser

### **Stephanie Hagspihl<sup>26</sup>**

Gewerbliche Küchen benötigen Trinkwasser als Zutat für Speisen und Getränke sowie für Gar-, Reinigungs- und Spülprozesse. Trinkwasser ist das wichtigste Lebensmittel des Menschen (Lebensmittel Nr. 1). Es unterliegt wie alle Lebensmittel europarechtlich der Verordnung (EG) Nr. 178/2002 des Europäischen Parlamentes und des Rates zur Festlegung der allgemeinen Grundsätze und Anforderungen des Lebensmittelrechts (sog. Lebensmittelbasisverordnung) sowie in Deutschland dem Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch (LFGB).

Die speziellen gesetzlichen und normativen Anforderungen an Trinkwasser sind in der Deutschen Trinkwasserverordnung (TrinkWV), in der Allgemeinen Verordnung für die Versorgung mit Wasser (AVBWasserV) sowie in DIN 2000:2017-02 (Zentrale Trinkwasserversorgung - Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen) geregelt.

Darüber hinaus stellt das Gesetz zur Verhütung und Bekämpfung von Infektionskrankheiten beim Menschen (Infektionsschutz-Gesetz - IfSG) eine weitere gesetzliche Grundlage zur Sicherung und Überwachung der Qualität des Trinkwassers dar, insbesondere unter hygienischen und mikrobiologischen Aspekten.

Lebensmittelrechtlich einwandfreies Trinkwasser steht in Deutschland im Normalfall zeitlich und örtlich unbegrenzt zur Verfügung. Die leitungsgebundene Trinkwasserversorgung wird regional durch kommunale oder privatwirtschaftliche Wasserversorgungsunternehmen sichergestellt.

Trinkwasser kann allerdings regional sehr unterschiedlich zusammengesetzt sein. An die Qualität des Trinkwassers in gewerblichen Küchen werden dabei zusätzliche Anforderungen gestellt. Wichtigste Kenngröße ist die Wasserhärte, im Wesentlichen der Gehalt an gelösten Calcium- und Magnesiumionen. Der Gehalt an Mineralsalzen hat einen maßgeblichen Einfluss auf die geschmackliche und ernährungsphysiologische Qualität der Speisen und Getränke, das Spülergebnis, den Bedarf an Spülmitteln sowie auf die Lebensdauer technischer Geräte.

### **Trinkwasserqualität**

Die Qualität des Trinkwassers wird primär mit Blick auf die menschliche Gesundheit definiert. Wasser für den menschlichen Gebrauch muss so beschaffen sein, dass durch seinen Genuss oder Gebrauch eine Schädigung der menschlichen Gesundheit insbesondere durch Krankheitserreger oder Schadstoffe wie z. B. Nitrat ausgeschlossen wird.

---

<sup>26</sup> Prof. Dr. Stephanie Hagspihl, Hochschule Fulda, Catering - Food Supply:  
<[stephanie.hagspihl@oe.hs-fulda.de](mailto:stephanie.hagspihl@oe.hs-fulda.de)>

Vor diesem Hintergrund unterliegt Trinkwasser als Lebensmittel Nr. 1 auch der EU-Hygieneverordnung. Trinkwasser und dessen Verwendung als Lebensmittel muss deshalb im HACCP-Konzept des Betreibers der gewerblichen Küche enthalten sein.

Die Anforderungen an Trinkwasser sind in der Trinkwasserverordnung (TrinkWV) festgelegt und beziehen sich auf

- die Beschaffenheit des Trinkwassers,
- die Aufbereitung des Trinkwassers,
- die Pflichten der Wasserversorger sowie
- die Überwachung des Trinkwassers.

### Wasserhärte

Mit der Wasserhärte wird die Äquivalentkonzentration der im Wasser gelösten Ionen von Erdalkalimetallen und ihren anionischen Partnern bezeichnet. Die Gesamtwasserhärte wird europaweit als Summe der im Wasser gelösten Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )- und Magnesiumionen ( $\text{Mg}^{2+}$ ) angegeben. Je mehr Calcium und Magnesium das Wasser enthält, desto „härter“ ist es. Die anionischen Partner dieser Erdalkali sind Carbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), Hydrogencarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ), Chlorid ( $\text{Cl}^-$ ) und Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

Die drei Härtebereiche des Trinkwassers gliedern sich wie in Tab. 2.13 beschrieben. Gemäß dem Internationalen Einheitensystem (SI-System<sup>27</sup>) wird die Gesamthärte in Mol pro Liter bzw. aufgrund der geringen Konzentrationen in Millimol pro Liter (mmol/l) angegeben.

Tab. 2.13: Wasserhärtebereiche

Angaben gemäß SI		Früher übliche Angaben	
Erdalkali (mmol/l)	Härtebereich (°dH)	Härtegrad	Bezeichnung
bis 1,5	1 - 2	0 - 8	weich
1,5 bis 2,5	2 - 3	8 - 14	mittel
ab 2,5	ab 3	ab 14	hart

Weiches Wasser ist für technische Anwendungen besonders gut geeignet, bei denen das Wasser erhitzt wird. Hartes Wasser kann zur Verkalkung von Gargeräten, Spülmaschinen oder Spülgut führen, einen erhöhten Verbrauch von Spül- und Reinigungsmitteln sowie eine Beeinträchtigung des Geschmacks und des Aussehens empfindlicher Speisen und Getränke verursachen. Hieraus können längere Maschinenstillstandzeiten, hohe Service- und Energiekosten, Flecken und Schlieren auf Besteck, Geschirr und Gläsern oder auch Getränke mit wenig ansprechender Optik, unangenehmen Gerüchen und Geschmack resultieren.

<sup>27</sup> SI: Système international d'unités - Internationales Einheitensystem

## **Carbonathärte**

Die Konzentration an Hydrogencarbonat-Ionen bzw. am hierzu äquivalenten Teil der Erdalkali-Ionen wird als Carbonathärte, temporäre oder vorübergehende Härte bezeichnet. Wasser befindet sich im sogenannten Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, wenn es genau so viel Kohlenstoffdioxid enthält, dass es gerade keinen Kalk abscheidet, aber auch keinen Kalk lösen kann. Die Wasserhärte basiert im Wesentlichen auf dem Vorhandensein von Calciumcarbonat. Dieses ist schwerlöslich, fällt bei höheren Temperaturen jedoch als Kalk (Kesselstein) aus.

## **Nichtcarbonathärte**

Als Nichtcarbonathärte, permanente oder bleibende Härte wird der Teil der Gesamtwasserhärte bezeichnet, der nicht an Hydrogencarbonat bzw. Carbonat gebunden ist und daher nicht als Calcium- oder Magnesiumcarbonat aus dem Wasser entfernt werden kann. Oft werden auch die Konzentrationen von Magnesium- und Calcium-Ionen getrennt bestimmt und dann als „Magnesiumhärte“ bzw. „Calciumhärte“ bezeichnet. Deren Summe entspricht in guter Näherung der Gesamtwasserhärte.

## **Aufbereitungsverfahren**

Je nach vorhandener Wasserqualität kommen in der gewerblichen Küche verschiedene Aufbereitungsverfahren zum Einsatz: die Enthärtung, die Teilentsalzung und die Vollentsalzung. Dies gilt vor allem für Trinkwasser, das in der Küche nicht als Lebensmittel, sondern in Spül- und Waschmaschinen eingesetzt werden soll.

## **Enthärtung**

Bei der Enthärtung des Wassers werden durch ein Ionenaustauschverfahren insbesondere Calcium- und Magnesiumionen (Härtebildner) gegen Natriumionen ausgetauscht. Zur Reduktion der Wasserhärte wird das Wasser beim Ionenaustauscher durch einen Behälter mit Kunststoffkügelchen geleitet, die als Oberflächenbeladung Natriumionen tragen. Diese werden durch die im Wasser enthaltenen Calciumionen verdrängt (Abb. 2.25).

Damit befinden sich im Wasser ausschließlich Salze, die keinen Kalk bilden können (Nichthärtebildner). Der Gesamtsalzgehalt und der elektrische Leitwert des Wassers bleiben bei diesem Verfahren jedoch bestehen.

Die Regenerierung des erschöpften Ionenaustauschers erfolgt mit einer konzentrierten NaCl-Lösung (Regeneriersalz). Die Natriumionen werden zwar vom Wasser mitgenommen, ihre Anwesenheit bedeutet aber keine Beeinträchtigung des Reinigungsprozesses, da die Löslichkeit von Natriumcarbonat sehr viel höher als die von Calciumcarbonat ist.

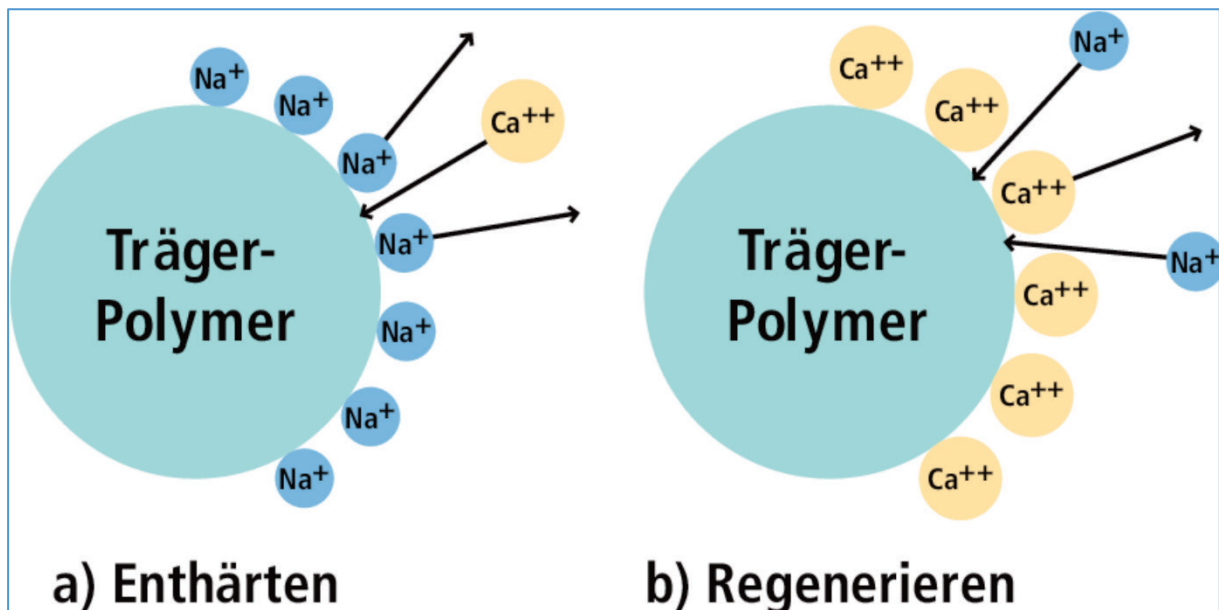


Abb. 2.25: Prinzipbild der Enthärtung von Trinkwasser und der Regenerierung des Ionenaustauschers

Die Kapazität des Ionenaustauschers ist begrenzt. Wenn der Vorrat an Natriumionen erschöpft ist, muss der Tauscher regeneriert werden. Dies erfolgt durch Spülen des Behälters mit konzentrierter NaCl-Lösung, wodurch wiederum die Calciumionen am Ionenaustauscher verdrängt und durch Natriumionen ersetzt werden. Das beim Regenerieren austretende Wasser wird ins Abwasser abgeleitet.

### Teilentsalzung

Wasser für verfahrenstechnische Prozesse stellt hohe Anforderungen an den Gesamtsalzgehalt. Dieser kann durch das Verfahren der Teilentsalzung gesenkt werden. Bei diesem Ionenaustauschverfahren wird ausschließlich die Carbonathärte des Wassers entfernt. Daher wird die Teilentsalzung auch Entkarbonisierung genannt. Dabei werden Hydrogencarbonatsalze ( $\text{HCO}_3^-$ ) der Calcium- und Magnesiumionen durch Protonen (Wasserstoffionen,  $\text{H}^+$ ) ersetzt.

Das Austauschfiltermaterial ist ein schwach saurer Ionenaustauscher. Für die Regenerierung kommt Salzsäure zum Einsatz. Um zusätzlich härtefreies Wasser zu erhalten, kann eine Enthärtung nachgeschaltet werden.

### Vollentsalzung

Um eine Vollentsalzung des Wassers zu erreichen, können zwei Verfahren zum Einsatz kommen, der Mischbett-Ionenaustausch und die Umkehr-Osmose. Durch das Mischbett-Ionenaustausch-Verfahren wird Trinkwasser mit Hilfe eines Mischbettharzes aufbereitet. Dieses besteht zum einen aus einem stark sauren Kationenaustauscherharz und zum anderen aus einem stark basischen Anionenaustauscherharz. Diese Bestandteile liegen zu gleichen Anteilen vor.

Das Mischbettharz wird gleichmäßig vom Wasser durchströmt. Dabei werden durch das Kationenaustauscherharz alle positiv geladenen Ionen, wie Calcium, Magnesium und Natrium durch  $H^+$ -Ionen ausgetauscht. Das Anionenaustauscherharz tauscht alle negativ geladenen Ionen wie Nitrat oder Chlorid durch  $OH^-$ -Ionen aus. Die nun enthaltenen  $H^+$ - und  $OH^-$ -Ionen verbinden sich zu  $H_2O$ . Das Ergebnis des Prozesses ist somit reines Wasser.

Alternativ können zur Vollentsalzung sogenannte „Osmoseanlagen“ eingesetzt werden. Beim Umkehr-Osmose-Verfahren wird das Wasser mit Hilfe hohen Drucks gegen den osmotischen Druck durch eine semipermeable Membran gepresst. Dabei entstehen auf der einen Seite das Permeat (Osmosewasser) und auf der anderen Membranseite das Konzentrat mit den gelösten Stoffen (Abb. 2.26).

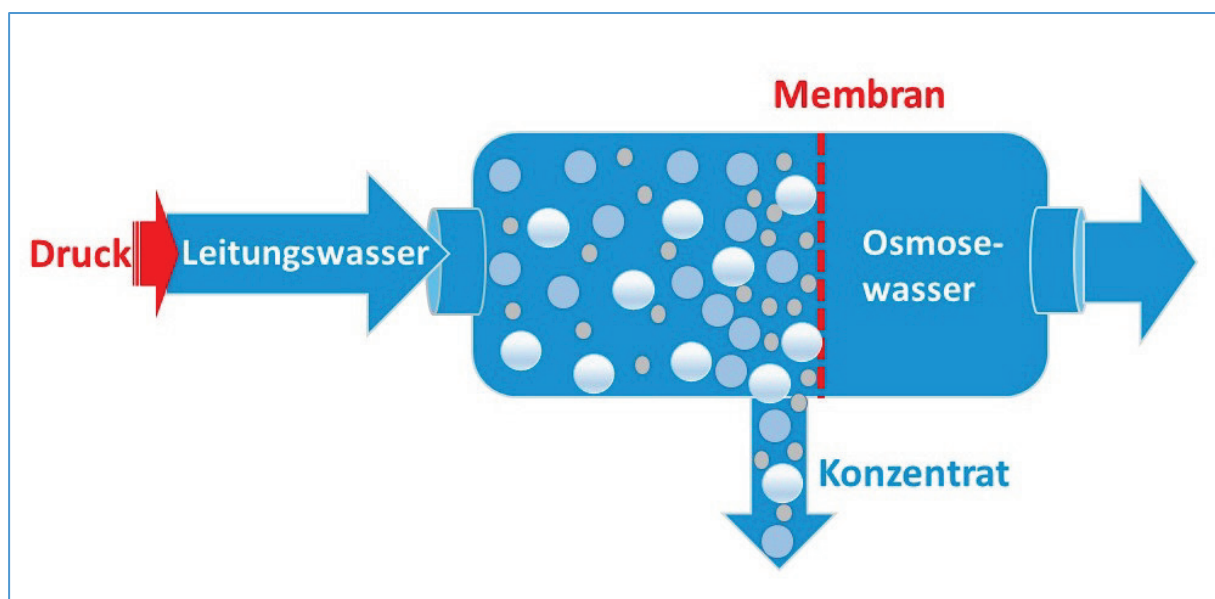


Abb. 2.26: Prinzip der Umkehr-Osmose zur Vollentsalzung von Trinkwasser (© S. Hagspihl)

Neben den Salzen können so auch Bakterien, Keime, Hormone und andere Stoffe aus dem Wasser gefiltert werden. Das gefilterte Osmosewasser wird in einem Behälter gespeichert und das Konzentrat mit den Salzen über den Abwasseranschluss entsorgt. Der Wasserverbrauch ist im Vergleich bei diesem Verfahren sehr hoch, da ein Teil des Trinkwassers als Konzentrat mit den gelösten Stoffen in den Abfluss geleitet wird.

### Elektrischer Leitwert als Qualitätsparameter

Das Vorhandensein der oben angesprochenen Ionen kann indirekt über den elektrischen Leitwert des Trinkwassers als Qualitätsparameter bestimmt werden. Der Leitwert wird für Trinkwasser üblicherweise in der Einheit Mikrosiemens pro Zentimeter ( $\mu S/cm$ ) angegeben. Die Bestimmung dieser Kenngröße beruht auf der Messung des elektrischen Stroms, der zwischen zwei Elektroden mit konstantem Abstand in der Trinkwasserprobe fließt. Je mehr Ionen im Trinkwasser enthalten sind, umso höher ist der elektrische Leitwert.

Reines Regenwasser hat einen Leitwert von ca. 30  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Laut Trinkwasserverordnung (TrinkWV) darf Leitungswasser bei einer Temperatur von 25 °C einen Leitwert von 2.790  $\mu\text{S}/\text{cm}$  nicht überschreiten.

### Chemische und mikrobiologische Qualitätsparameter

Abgesehen von den im Zusammenhang mit der Wasserhärte genannten Ionen kann Trinkwasser innerhalb bestimmter Grenzen weitere Bestandteile enthalten, die oberhalb von Grenzwerten unzulässige Verunreinigungen darstellen. Diese können aus der Trinkwassergewinnung, aus der Verteilung durch das Leitungssystem der lokalen Wasserversorger oder aus der Trinkwasserinstallation vor Ort stammen. Die zulässigen Grenzwerte sind in der Trinkwasserverordnung (TrinkWV) festgelegt.

Zu den **chemischen** Verunreinigungen zählen vor allem Schwermetalle, radioaktive Elemente (z. B. Uran, Radon, Tritium), organische Verbindungen (Pflanzenschutzmittel, Biozide) und Nitrit/Nitrat. Die wichtigsten chemischen Verunreinigungen und deren Grenzwerte zeigt Tab. 2.14.

Tab. 2.14: Ausgewählte chemische Verunreinigungen und deren Grenzwerte nach TrinkWV

Verunreinigung	Grenzwert (mg/l)	Verunreinigung	Grenzwert (mg/l)
Antimon	0,005	PAK <sup>28</sup>	0,0001
Arsen	0,01	Nitrit	0,5
Benzo-(a)-pyren	0,00001	Nitrat	50
Blei	0,01	Biozide (Summe) <sup>29</sup>	0,0005
Cadmium	0,003	Quecksilber	0,001
Kupfer	2,0	Trihalogenmethane	0,05
Fluorid	1,5	Uran	0,01
Nickel	0,02	Vinylchlorid	0,0005

Dabei unterscheidet die TrinkWV zwischen Parametern, deren Konzentration sich im Verteilnetz einschließlich der Trinkwasserinstallationen vor Ort nicht mehr erhöht, und solchen, deren Konzentration bis zur Entnahme noch ansteigen kann.

Zu den **mikrobiologischen** Verunreinigungen gehören vor allem Escherichia Coli (E. Coli), Enterokokken, Pseudomonas aeruginosa und Legionellen. Die wichtigsten mikrobiologischen Verunreinigungen und deren Grenzwerte zeigt Tab. 2.15.

<sup>28</sup> PAK: Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe.

<sup>29</sup> Biozide: Pflanzenschutzmittel



Tab. 2.15: Ausgewählte mikrobiologische Verunreinigungen und deren Grenzwerte nach TrinkWV

Verunreinigung	Grenzwert	Verunreinigung	Grenzwert
Clostridium perfr.	0/100 ml	Enterokokken	0/100 ml
Coliforme (Summe)	0/100 ml	Legionella spec.	100/100 ml
Escherichia coli	0/100 ml	Pseudomonas	0/250 ml

Der in Tab. 2.15 angegebene Wert für Legionella spec. ist ein technischer Interventionswert und in diesem Sinn kein Grenzwert für etwa zulässige Kontaminationen. Vielmehr deutet dessen Überschreitung an der Entnahmestelle darauf hin, dass in der Trinkwasserinstallation vor Ort eine Gefahr durch Legionellen vorliegt. Legionellen sind humanpathogene Bakterien, die im Temperaturbereich von 5 bis 55 °C lebensfähig und erst oberhalb von 60 °C inaktiviert werden können.



Legionellen können nach langen Stillstandszeiten in Kaltwasserleitungen auftreten, sich vor allem aber in Warmwasserspeichern bei Temperaturen im Bereich von 35 bis 45 °C exponentiell vermehren. Diese Gefahr wird durch technische Maßnahmen wie z. B. die Erhöhung der Warmwassertemperatur auf mehr als 60 °C zuverlässig beherrscht. Betreiber von Installationen, in denen es zu einer Vernebelung des Trinkwassers kommt wie z. B. in Duschen von Krankenhäusern, Schulen, Hotels, Sportanlagen sind laut § 14b TrinkWV verpflichtet, regelmäßige Untersuchungen auf Legionellen durch eine akkreditierte Untersuchungsstelle vornehmen zu lassen.

Aktuelle Fachinformationen zum Thema Trinkwasser können ebenso wie die jüngste Fassung der TrinkWV beim Deutschen Verein des Gas- und Wasserfachs (DVGW) abgerufen werden (<https://www.dvgw.de>). Des Weiteren stehen die lokalen Trinkwasserversorger und Gesundheitsämter als Ansprechpartner für Fragen zum Trinkwasser zur Verfügung.





## 2.5 Lüftung

### Peter Schwarz<sup>30</sup> und Michael Greiner<sup>31</sup>

In den letzten Jahren sind für gewerbliche Küchen neue Zubereitungskonzepte mit verbesserter Gerätetechnik entwickelt worden, was auch für die Anforderungen an die Lüftungsanlagen und damit deren Planung spezielle Auswirkungen hat. Außerdem sind die Ansprüche an das Küchenklima aufgrund von neuen Forderungen bezüglich des Arbeitsschutzes deutlich verschärft worden.

Zwar ist heute die Grundfläche der Küchen durchweg kleiner als früher, jedoch werden darauf mehr und mehr leistungstärkere Multifunktionsgeräte eingesetzt. Aufgrund der Multifunktion dieser Geräte muss daher mit einer größeren Auslastung und damit mit einem höheren Gleichzeitigkeitsfaktor gerechnet werden. Zudem setzt sich die im Gastraum durchgeführte Speisenzubereitung - Stichwort: „Front Cooking“ - immer mehr durch (Abb. 2.27). Auch deshalb steigen die Anforderungen an die Luftqualität und die Ablufterfassung.



Abb. 2.27: Frontcooking, hier am Beispiel einer Ausgabestation eines Hotelrestaurants

<sup>30</sup> Prof. Dr. Peter Schwarz, Hochschule Albstadt-Sigmaringen, Fakultät Life Sciences.  
<[schwarz@hs-albsig.de](mailto:schwarz@hs-albsig.de)>

<sup>31</sup> Prof. Dr. Michael Greiner, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Systemgastronomie, Catering.  
<[michael.greiner@hswt.de](mailto:michael.greiner@hswt.de)>

## Grundlagen

### Luftqualität

Die Luftqualität in der Küche ist im Wesentlichen bestimmt durch die Parameter

- Lufttemperatur,
- Luftfeuchtigkeit,
- Schadstoffgehalt der Raumluft und
- Luftgeschwindigkeit, im speziellen die der Zuluft.

Der beim Betrieb der Lüftungsanlage durch Ventilator und Strömungsgeräusche verursachte Geräuschpegel kommt als Qualitätskriterium hinzu, wobei besonders auch auf die Strömungsgeräusche der Aerosolabscheider zu achten ist. Bezüglich des Raumklimas werden Temperaturen zwischen 20 und 24 °C sowie relative Luftfeuchten zwischen 50 und 70 % als angenehm empfunden.

Jedoch sind diese Kriterien in diversen Arbeitsstätten schwierig zu realisieren. Daher sollte auch im Extremfall der Erträglichkeitsbereich eingehalten werden, der durch eine Temperatur von maximal 32 °C und eine relative Feuchte von maximal 30 % begrenzt wird. Vorzuziehen ist jedoch die Einhaltung des nach ASR 3.5 (Arbeitsschutzrichtlinie) vorgegebenen Bereichs mit einer Lufttemperatur von maximal 26 °C. Liegen die tatsächlichen Temperaturwerte längerfristig über 26 °C, müssen Gegenmaßnahmen ergriffen werden, wie eine Verschattung, höhere Lüftungswerte oder eine Reduzierung der Arbeitsintensität.

Außerdem sollten keine Zugerscheinungen auftreten. Schon eine Luftgeschwindigkeit von mehr als 0,5 m/s wird bei 20 °C als störend empfunden. Dies kann bereits der Fall sein, wenn die Zuluft einen Mengenstrom von  $90 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  überschreitet. In vielen Fällen ist aber ein Zuluftmengenstrom von bis  $120 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  zu realisieren, was eine besondere Beachtung der Einbringung der Zuluft in den Raum bedingt.

Insbesondere bei raumluftechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) wird der Energiebedarf immer kritischer betrachtet. Dabei lassen sich hier erhebliche Kosten einsparen und zugleich geringere Umweltentlastungen realisieren, wenn bei Neuanschaffung oder Ersatz einige wichtige Aspekte beachtet werden. Das sind im Wesentlichen

- eine bedarfsgerechte Dimensionierung der Anlage und eine sinnvolle Zuluft-einbringung;
- die Installation einer elektronischen Regelung und
- der Einsatz von Wärmerückgewinnungssystemen mit gleichbleibendem Wirkungsgrad.

## Luftbelastung in der Küche

Bei der Luftbelastung in gewerblichen Küchen ist zwischen küchenspezifischen internen und externen Lasten zu unterscheiden.

### Interne Lasten

Zu den internen Lasten zählen:

- Wrasen und Fettbestandteile aus dem Gargut
- Wärmeabgabe der thermischen Geräte durch Konvektion und Strahlung
- Feuchtigkeitsabgabe durch den Garprozess
- Feuchtigkeitsabgabe durch den Spülprozess bzw. Oberflächenverdunstung des Spülguts
- gasförmige luftfremde Stoffe / Gerüche / Verbrennungsprodukte.

Eine Folge dieser internen Lasten sind zunehmende Erwärmung und ansteigende Feuchtigkeit während der Gar- oder Spülvorgänge.

Für die unmittelbare Temperaturerhöhung in den Küchenräumen ist die in den Raum abgegebene thermische Energie<sup>32</sup> verantwortlich. Die Luftfeuchtigkeit selbst ist ebenfalls potentieller Energieträger, denn beim Phasenübergang zur Kondensation wird die Kondensationsenthalpie<sup>33</sup> freigesetzt.

Werden die Abluftvolumenströme in der Küche zu gering dimensioniert oder die Zuluft bereits zu feucht eingebracht (beispielsweise schwül/warm im Sommer), so besteht ein erhebliches Risiko einer zu hohen Luftfeuchtigkeit und damit das Risiko der Schimmelbildung an den Flächen, die aufgrund ihrer niedrigeren Temperatur Kondensation von Luftfeuchte verursachen. Dies sind insbesondere kühlere Wand- und Deckenbauteile oder auch Fensterflächen. Hier wandelt sich die Luftfeuchtigkeit infolge der Unterkühlung in Kondenswasser (zuweilen auch Tauwasser genannt) um.

Bei Induktionshauben ist darauf besonders zu achten, da hier nur ein Teil der angesaugten Luft erwärmt und in den Raum abgegeben wird. Der zumeist größere Teil wird über sogenannte Schlitzdüsen zur Optimierung des Ansaugdrucks direkt in die Ablufthaube eingeblasen und von dort mit der angesaugten Küchenluft abgeführt. Die Entfeuchtung ist damit deutlich ineffizienter als bei „normalen“ Ablufthauben.

---

<sup>32</sup> Die thermische Energie hieß früher „fühlbare“ oder auch „sensible Wärme“ (siehe Kap. 2.1).

<sup>33</sup> Die Kondensationsenthalpie hieß früher „latente Wärme“ (siehe Kap. 2.1).

Gasförmige, luftfremde Stoffe werden ebenso zu den internen Lasten gezählt, da diese durch Garprozesse verursacht werden. Die bei gasbefeuerten Küchengeräten entstehenden Verbrennungsprodukte werden dann zuverlässig abgeführt, wenn die Bemessung des Luftvolumenstroms entsprechend VDI 2052<sup>34</sup> oder DIN EN 16282-1<sup>35</sup> erfolgt und die raumlufttechnische Anlage der Küche auch mit den entsprechenden Volumenströmen betrieben wird. Auch die Versorgung mit Verbrennungsluft für die Gaskochgeräte ist in diesem Fall sichergestellt.

Bei allen Garverfahren entstehen durch die Erhitzung der Lebensmittel luftfremde Stoffe und Gerüche. Deren Art und Menge werden durch den Fettgehalt des Garguts und die Gartemperatur beeinflusst. Vor allem die durch hohe Gartemperaturen entstehenden Pyrolyseprodukte können gesundheitsschädliche Wirkung haben. Die Einhaltung niedriger Schadstoffkonzentrationen ist von größter Bedeutung für die Gesundheit des Personals. Hierunter fällt auch der Feinstaubgehalt (z. B. Aerosole) in der Küche. Die zulässigen Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) sind in den „Technischen Regeln für Gefahrstoffe“ (TRGS 900) vorgeschrieben. Diese werden vom Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) festgelegt.

### **Externe Lasten**

Die hier näher ausgeführten externen Lasten sind nicht durch die Nutzung der Räume als Küche bedingt, sondern durch den Baukörper selbst und dessen Exposition bzw. Orientierung zu den Himmelsrichtungen. Sämtliche externe Lasten sind bei der Berechnung der erforderlichen Volumenströme nach VDI 2052 oder DIN EN 16282 nicht berücksichtigt und müssen fachtechnisch gesondert bewertet werden.

Im Sommer sind die unmittelbare Sonneneinstrahlung und die Außenlufttemperatur ausschlaggebend, die externe thermische Lasten in der Küche entweder direkt als IR-Strahlung durch die Fensterflächen oder als Transmission über die Hüllflächen der Küche generieren können.

Auch winterliche Kälte - also kühlere Außenlufttemperatur - wird zu den externen Lasten gezählt. Während der Produktionszeiten in der Küche dürfte wegen der geringen Außentemperatur keine Kompensationsmaßnahme erforderlich sein, da auch im Winter eher noch Wärme über das Lüftungssystem abzuführen ist. Der Heizwärmebedarf kann entweder durch statische Heizflächen in der Küche bzw. den Nebenräumen während der nutzungsfreien Zeiten oder über das Lüftungssystem selbst gedeckt werden, das dann allerdings ganztägig betrieben werden muss.

---

<sup>34</sup> VDI 2052: Raumlufttechnische Anlagen für Küchen.

<sup>35</sup> DIN EN 16282-1:2017: Einrichtungen in gewerblichen Küchen - Elemente zur Be- und Entlüftung - Teil 1: Allgemeine Anforderungen einschließlich Berechnungsmethoden.



## Luftströmungsarten

Küchen und angrenzende Bereiche sind aus Gründen des Arbeitsschutzes sowie der Hygiene durch raumlufttechnische Anlagen zu belüften. Die durch die Garverfahren entstehenden Energie- und Stofflasten müssen aus der Küche abgeführt und frische Außenluft aus hygienisch unbedenklichen Bereichen der Küche zugeführt werden. Dies dient neben der Erfüllung der hygienischen Anforderungen an die Raumluftqualität weiterhin der Regulierung der Temperatur und Raumfeuchte in der Küche.

Sowohl VDI 2052 als auch DIN EN 16282 als allgemeingültige Richtlinien für die Raumlufttechnik in gewerblichen Küchen empfehlen einen möglichst ausgeglichenen Lufthaushalt im gesamten Küchenbereich. Das Nachströmen von hygienisch bedenklicher Luft aus anderen Bereichen ist zu vermeiden. Die gesamte abgeführte Abluftmenge muss also bei der konventionellen Küchenlüftung durch temperierte Zuluft ersetzt werden. Diese Zuluft wird in der Regel über geeignete Einlassöffnungen in den Raum eingebracht.

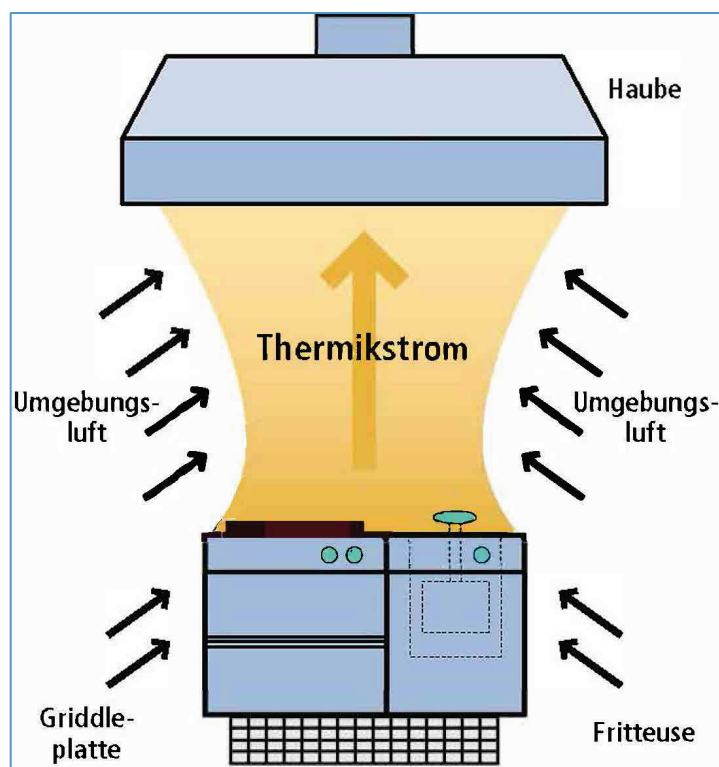


Abb. 2.28: Thermikstrom über einem Küchenblock

Die Erfassung und Absaugung der entstehenden Wrasen muss oberhalb der verursachenden thermischen Küchengeräte erfolgen. Hier bildet sich eine als Thermikstrom bezeichnete freie Konvektionsströmung, die ihrerseits Luft aus der Umgebung induziert (Abb. 2.28). Diese induzierte Umgebungsluft kann durch die Anordnung der Küchengeräte an der Wand reduziert werden, was wiederum eine Verminderung des Erfassungsluftstroms zur Folge hat. Die Anordnung der Küchengeräte hat also einen wesentlichen Einfluss auf die erforderliche Abluftmenge.

## Ablufterfassung

### Ablufthauben

Die aufsteigenden schadstoffhaltigen Luftströme können über dem Ort des Entstehens mittels Dunstabzugshauben erfasst werden (Abb. 2.29). Für die Gestaltung und Positionierung der Hauben sind die o. g. Richtlinien (VDI 2052 & DIN EN 16282) zu beachten.



Abb. 2.29: Passgenaue Ausführung von Ablufthauben

Die Unterkante der Hauben sollte üblicherweise auf 2,10 m über dem Fußboden liegen. Die Haubenhöhe sollte mindestens 0,4 m betragen, wobei das Stauraumvolumen der Haube (entspricht dem Erfassungsvolumen der Haube) mindestens dem Volumenstrom einer Sekunde entsprechen sollte. Der Überstand der Haube muss mindestens 0,3 m umlaufend über dem Küchengerät betragen, bei Geräten mit Türöffnungen mindestens 0,6 m auf der Türseite (Abb. 2.30).

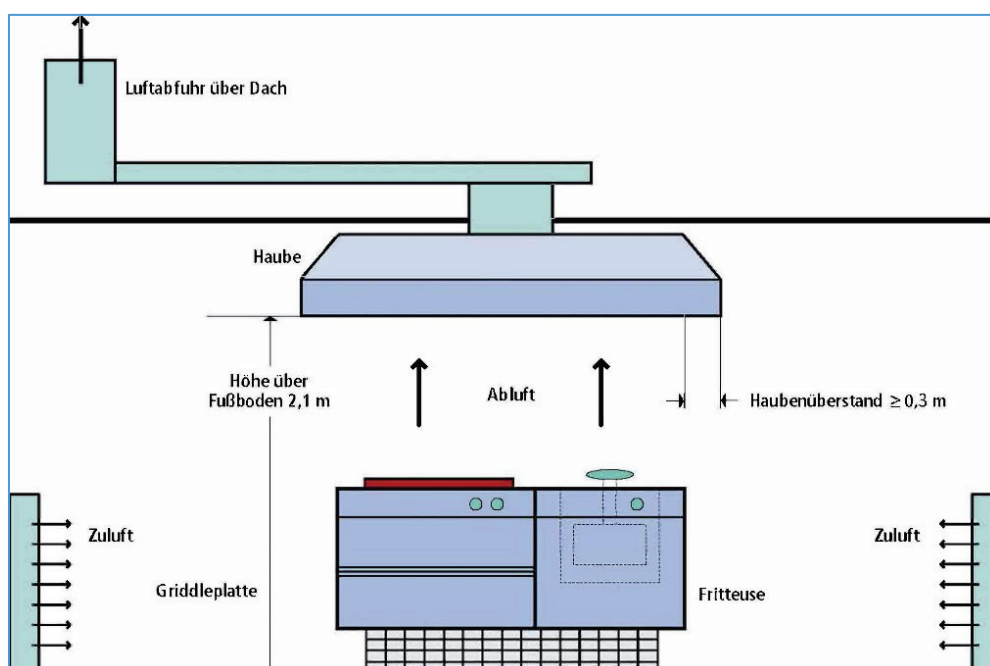


Abb. 2.30: Anordnung und Dimensionierung einer Ablufthaube

Grundsätzlich bezieht sich der Haubenüberstand auf das lichte Maß zwischen der Vorderkante des Küchengeräts und der Innenkante der Haube. Sollte die Unterkante der Ablufthaube höher als die "Normalhöhe" von 2,1 m liegen, sind die Überstände entsprechend anzupassen. Es ist mindestens ein Öffnungswinkel von 15° zwischen Gerätevorderkante und Haubeninnenkante einzuhalten.

Um zu vermeiden, dass aerosol- und wrasenbelastete Abluft in Abluftleitungen gelangt, muss die Abluft durch hochwirksame Aerosolabscheider gereinigt werden. Diese Abscheider müssen in einem Winkel von 35° bis 45° eingebaut und zu Reinigungszwecken leicht demontierbar sein. Durch die in den Aerosolabscheidern mehrfach gegenüberliegend versetzt angeordneten Prallbleche in Lamellenform wird der Abluftstrom mehrfach umgelenkt, wodurch - beruhend auf dem Massenträgheitsgesetz - die Aerosole gegen die Prallbleche schlagen und abgeschieden werden (Abb. 2.31).

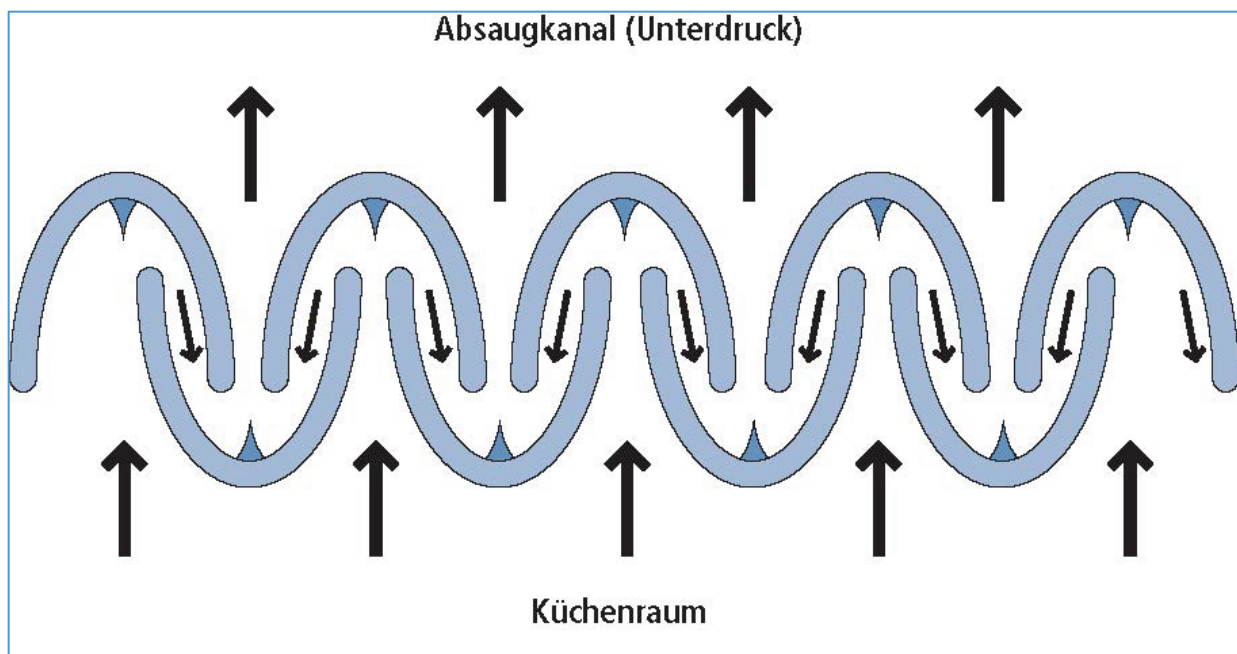


Abb. 2.31: Prallblech-Fettabscheider

Das abgeschiedene Aerosol fließt in die unter den Abscheidern befindliche Aerosolsammelrinne der Haube. Alle über thermischen Geräten eingesetzten Aerosolabscheider müssen flammendurchschlagsicher sein. Ein entsprechendes Prüfzertifikat ist vorzuweisen. Die früher allein eingesetzten Metallgestrickfilter sind aus brandschutztechnischen Gründen nicht mehr zulässig. Ausnahme sind Kombinationsfilter mit vorgeschalteten geprüften Aerosolabscheidern.

Dunstabzugshauben werden in der Regel an ein Abluftkanalsystem angeschlossen, das die Abluft mittels Unterdruck ansaugt.

## Lüftungsdecken

Küchenlüftungsdecken stellen die Komplettlösung für gewerbliche Küchen dar. Sie bieten neben der großflächigen Erfassung der Abluft weiterhin die Einbringung der Zuluft sowie die Beleuchtung und Deckenverkleidung für den gesamten Küchenbereich (Abb. 2.32).



Abb. 2.32: Lüftungsdecke in einer großen Produktionsküche

Die Gestaltung der Lüftungsdecken ist abhängig von der Kücheneinrichtung und den vorhandenen thermischen Geräten. Die Erfassung der Wrasen und Dünste erfolgt wie bei Dunstabzugshauben oberhalb der Entstehungsstellen. Die Abluft wird durch Deckendurchlässe erfasst und abgeführt. Durch die in den Deckendurchlässen eingebauten, flammendurchschlagssicheren Aerosolabscheider wird die Abluft vorgereinigt.

Anhand der Luftführung oberhalb der Deckendurchlässe lassen sich die Lüftungsdecken grob in offene und geschlossene Deckensysteme unterscheiden. Bei geschlossenen Systemen sind die Luftdurchlässe direkt an die Luftleitungen (Abluftkanäle) angeschlossen (Abb. 2.33). Bei offenen Systemen wird die Abluft dagegen über den Deckendruckraum geführt.

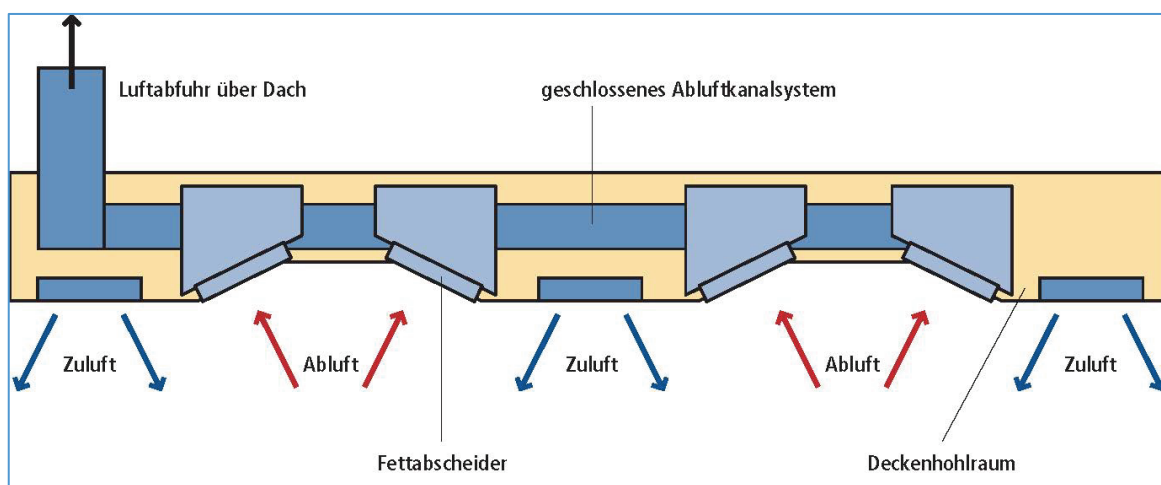


Abb. 2.33: Luftführung bei einer Lüftungsdecke - geschlossenes System

Das gesamte abgeführte Abluftvolumen muss kontrolliert durch Frischluft wieder ersetzt werden. Dies kann sowohl über den Deckendruckraum (offene Lösung) als auch über direkt an die Luftleitungen angeschlossene Zuluftleinlässe (geschlossene Lösung) erfolgen.

Zu beachten ist, dass die Gestaltung der Zuluftführung erheblichen Einfluss auf die Strömungsverhältnisse und damit auf die Verteilung der Schadstoffe im Raum hat. Es ist folglich für jede Küche eigens ein passendes Luftführungskonzept zu erarbeiten, unter Berücksichtigung der entsprechenden Richtlinien.

### **Zuluft einbringung in die Küche**

Mit raumlufthechnischen Anlagen lässt sich die Zuluft im Raum so verteilen, dass kontrollierte Strömungsmuster entstehen. Abhängig von der Art der Lastabfuhr unterscheidet man in der Raumlufthechnik zwei Grundströmungsmuster:

- Mischströmung und
- Schichtströmung, häufig auch als Quelllüftung bezeichnet.

Die Zuluft ist so in den Raum einzubringen, dass eine vollständige und möglichst gleichmäßige Raumdurchlüftung gewährleistet ist. Insbesondere sollen auch Eckbereiche so belüftet werden, dass es dort nicht zu stehender Luft kommt.

### **Mischströmung**

Die saubere Zuluft und die durch luftfremde Stoffe an den Gargeräten belastete Raumlufthe vermischen sich vollständig. So verdünnt die Außenluft die belastete Raumlufthe und erreicht dadurch nahezu in der gesamten Küche gleiche Temperaturen und Stoffkonzentrationen. Von dieser Art der Zuluft einbringung ist in Großküchen allerdings abzuraten, da sowohl der Luftaustausch eher ineffizient als auch Ungleichmäßigkeiten durch störende Thermikströme auftreten. Daher wird hierauf nicht weiter eingegangen.

### **Schichtströmung**

Schichtströmungen wirken lastmindernd für den Aufenthaltsbereich der Personen, sowohl hinsichtlich der thermischen als auch der stofflichen Belastung. Durch die impulsarme Zuluft einbringung kann ein natürlicher Thermikstrom entstehen. Mit ihr wird die erwärmte und mit luftfremden Stoffen angereicherte Luft aus dem Garbereich nach oben gefördert und dort über entsprechende Erfassungseinrichtungen abtransportiert. Wird dieser thermisch erzeugte Luftstrom im Aufenthaltsbereich durch Zuluft ersetzt, kann die Stoffbelastung für den Menschen nahezu vermieden und die Belastung durch Wärme um bis zu 50 % reduziert werden. Die Luftzuführung ist dabei so impulsarm zu wählen, dass die Thermikströmung ungestört bleibt.

### **Ausführungsform: Luftdurchlässe an der Decke (Verdrängungsluft)**

Durch Luftdurchlässe außerhalb des Einflussbereichs der Thermikströmung kann das Nachführen der Zuluft in den Aufenthaltsbereich von der Raumdecke aus erfolgen. Die kältere Zuluft strömt aufgrund ihres höheren spezifischen Gewichts zum Boden hin und erzeugt mitsamt der höheren Temperaturen der thermischen Geräte den thermischen Luftstrom.

Die großflächigen Luftdurchlässe sollen gleichmäßig beaufschlagt sein und eine möglichst geringe Luftaustrittsgeschwindigkeit von  $v_A \leq 0,2$  m/s bezogen auf die Ausströmfläche haben. Die Luft Eintrittstemperatur soll ca. 19 °C in Garküchen nicht unterschreiten.

### **Ausführungsform: Luftdurchlässe im Aufenthaltsbereich (Quellluft)**

In gewerblichen Küchen ist es optimal, diese Art von Zuluft einbringung umzusetzen. Durch die sehr langsame Luftaustrittsgeschwindigkeit  $v_A \leq 0,4$  m/s und eine gleichmäßige Beaufschlagung der Luftdurchlässe kann sich im Aufenthaltsbereich ein sog. „Kaltluftsee“ ausbilden. Bei der Aufstellung der Luftdurchlässe ist zu beachten, dass diese im Bereich von 0,2 m bis maximal 2 m über dem Boden installiert werden. Wenn dies beachtet wird, kann die Zulufttemperatur ca. 20 °C betragen. Bei einer optimalen Platzierung der Auslässe wird es nahezu keine Vermischung der Zuluft mit der Raumluft geben. Im Aufenthaltsbereich können die stofflichen Lastreduzierungen ca. 60 - 70 % und die thermischen Lastreduzierungen ca. 50 % im Vergleich zur Mischströmung betragen, bei gleichem Zuluftstrom.

### **Luftwechselzahl**

Eine ausschlaggebende Kenngröße für die Auslegung einer raumlufttechnischen Anlage ist die erforderliche Luftwechselzahl (*LWZ*). Sie beschreibt, wieviel Frischluft im Verhältnis zur Raumgröße gefördert wird. Die *LWZ* ist der Quotient aus der stündlichen Fördermenge  $q_H$  an Frischluft und dem Raumvolumen  $V$ :

$$LWZ = q_H / V$$

Die *LWZ* sagt also aus, welches Vielfache des Raumvolumens pro Stunde an Frischluft eingebracht wird. Dabei ergibt sich eine mehr oder weniger starke Vermischung der zugeführten Frischluft mit der vorhandenen Raumluft, bevor dieses Gemisch aus dem Raum abgeführt wird. Diese sogenannte Lüftungseffizienz muss bei der Auslegung der erforderlichen *LWZ* berücksichtigt werden. Bei gewerblichen Küchen sind *LWZ*-Werte von 20 bis 40 erforderlich, wobei die genauen Werte von der Produktionsintensität sowie den verwendeten Produktionsgeräten und Zubereitungsarten abhängen. So ist bei der Nutzung von Gasherden auf ausreichende Sauerstoffzufuhr in die Raumluft über die Frischluft zu achten (siehe Kap. 2.2).



Die LWZ hat auch erhebliche Bedeutung für die energetische Bewertung von Gebäuden gemäß DIN 12831-1<sup>36</sup>, da die zugeführte Frischluft in der Regel mit energetischem Aufwand klimatisiert werden muss.

### Wärmerückgewinnung

Warme Abluft enthält Energie. Diese kann durch Wärmerückgewinnung genutzt werden. Hierzu bieten sich einfache Plattenwärmetauscher an: Die warme Abluft strömt dabei auf der einen Seite von Wärmetauscherblechen, auf der anderen Seite die Zuluft. Diese wird bei solchen „Kreuzstrom-Wärmetauschern“ über das Trennblech erwärmt (Abb. 2.34). Auf geringe Lecklufttraten ist beim "Kreuzstrom-Wärmetauscher" zu achten. Aus diesem Grunde ist der Einsatz eines Rotationswärmetauschers ausgeschlossen.

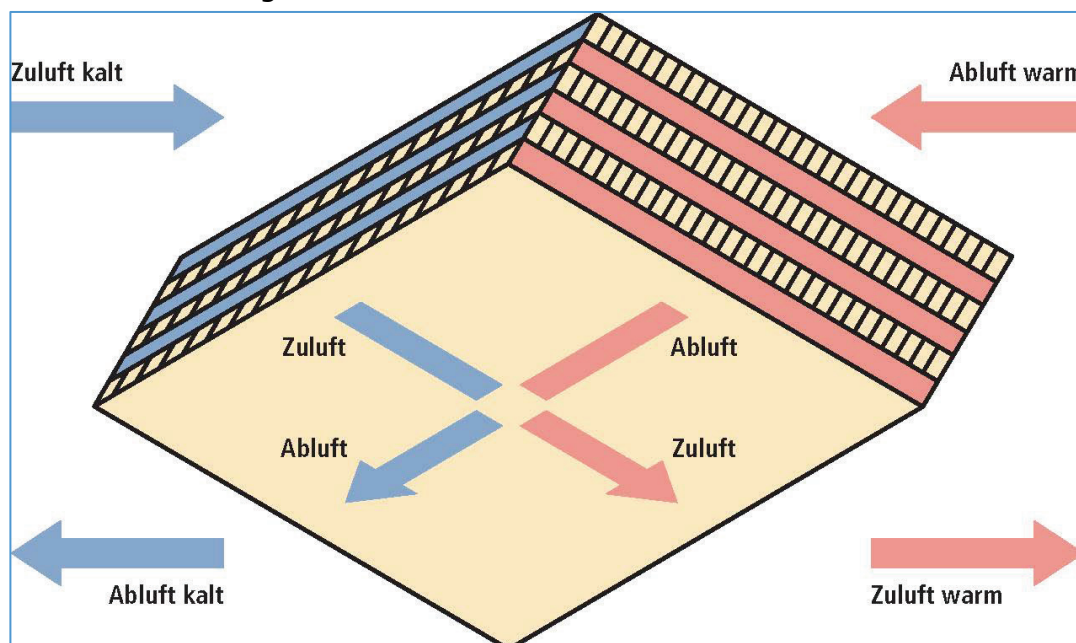


Abb. 2.34: Kreuzstrom-Wärmetauscher

Eine andere Möglichkeit besteht im Einsatz eines Kreislaufverbundsystems (KVS). Mit diesem kann über das ganze Jahr eine effektivere Wärmerückgewinnung erfolgen, z. B. für die Erwärmung von Brauchwasser über die Rückgewinnung von Energie aus der Abluft.

Eine weitere Möglichkeit zur Energieeinsparung besteht darin, den Luftaustausch entsprechend der aktuellen Wärmelast zu regeln. Eine solche „bedarfsgesteuerte“ Lüftung wird durch einen Teillastbetrieb der lufttechnischen Anlage realisiert: Abluft- und Zuluftstrom werden dem jeweiligen Lüftungsbedarf angepasst. Dabei wird die Drehzahl der Ventilatoren elektronisch verändert. Maximale Energie-Einspar-Effekte ergeben sich in Verbindung mit Einzelhauben, die nur aktiv werden, wenn ein darunter befindliches Gargerät in Betrieb ist.

<sup>36</sup> DIN 12831-1: 2017 Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast.

Die Einsparung wirkt sich im Winter doppelt aus: Es wird nicht nur weniger Energie für den Ventilatorbetrieb benötigt, sondern auch der Heizenergiebedarf sinkt, weil weniger Zuluft erwärmt werden muss.

Seit 2007 fordert die Energieeinsparverordnung (EnEV 2007) verbindlich, dass raumlufttechnische Anlagen mit einem Zuluft-Volumenstrom von mehr als 4.000 m<sup>3</sup>/h mit einer Einrichtung zur Wärmerückgewinnung ausgestattet sein müssen. Zudem ist die Lüftungsleistung den thermischen und stofflichen Lasten anzupassen.<sup>37</sup>

Mit Wirkung zum 01. November 2020 vereinheitlicht das neue Gebäudeenergiegesetz (GEG 2020)<sup>38</sup> die teils unterschiedlichen gesetzlichen Regelungen im Bereich Energieeinsparung und passt diese zudem an europäische Vorgaben zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden an. Das GEG löst zum genannten Termin gleichzeitig das Energieeinsparungsgesetz (EnEG 2013)<sup>39</sup>, das Erneuerbare-Energie-WärmeG 2011)<sup>40</sup> und die oben genannte Energieeinsparverordnung (EnEV 2007) ab.

---

<sup>37</sup> EnEV 2007: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung En-EV) vom 24. Juli 2007 (BGBl. I S. 1519), zuletzt geändert durch Artikel 257 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328).

<sup>38</sup> GEG 2020: Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz–GEG) vom 08. August 2020 (BGBl. I Nr. 37).

<sup>39</sup> EnEG 2013: Energieeinsparungsgesetz in der geänderten Fassung vom 04. Juli 2013. BGBl. 2013 Teil I Nr. 36, ausgegeben zu Bonn am 12. Juli 2013.

<sup>40</sup> EEWärmeG 2011: Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich 2011. BGBl. 2011 Teil I Nr. 17, ausgegeben zu Bonn am 15. April 2011.

## 2.6 Beleuchtung

### **Sascha Skorupka<sup>41</sup>**

Eine ausreichende Beleuchtung am Arbeitsplatz ist gesetzlich vorgeschrieben. Sie wird nicht nur durch die Lebensmittelhygiene-Verordnung verlangt, sondern auch durch alle Arbeitsstättenrichtlinien für gewerbliche Bereiche. Inwieweit die Beleuchtung ausreichend ist, wird dabei durch viele Faktoren wie z. B. Helligkeit, Lichtfarbe und Blendfreiheit bestimmt.

Die Beleuchtung am Arbeitsplatz hat aus vielerlei Gründen eine hohe Bedeutung. Ausreichendes Licht mindert vor allem die Unfallrisiken sowie die Gesundheitsgefährdung und erhöht die Konzentration, indem es die sehphysiologischen und psychischen Anforderungen erfüllt. Eine angenehme Beleuchtung trägt darüber hinaus auch zur Steigerung des allgemeinen Wohlbefindens bei. In der gewerblichen Küche kann sowohl natürliches als auch künstliches Licht genutzt werden. Die Aufgaben des Verantwortlichen für die Küche bestehen darin,

- die benötigte Beleuchtungsstärke und Lichtart am richtigen Ort bereitzustellen,
- einfache Betriebsbedingungen für die Beleuchtung zu gewährleisten,
- Lampen mit möglichst hohem Wirkungsgrad und niedrigen Anschaffungskosten zu wählen und
- die Speisenpräsentation für den Gast in das „rechte Licht“ zu rücken.



Um sinnvolle Entscheidungen treffen zu können, sind Grundkenntnisse aus der Lichttechnik hilfreich.

<sup>41</sup> Prof. Dr. Sascha Skorupka, Hochschule Fulda, Physik und Technik: [sascha.skorupka@oe.hs-fulda.de](mailto:sascha.skorupka@oe.hs-fulda.de)

## Grundlagen

### Sichtbares Licht

Als „Licht“ bezeichnen wir die elektromagnetischen Wellen, die vom menschlichen Auge wahrgenommen werden können. Ganz allgemein lassen sich elektromagnetische Wellen durch den Abstand und die Höhe ihrer Wellenberge bestimmen, ähnlich, wie man das auch bei Wasserwellen am Strand beobachten kann. Die Höhe der Wellenberge wird Amplitude genannt, sie entspricht der empfundenen Helligkeit. Der Abstand der Wellenberge wird Wellenlänge genannt und üblicherweise mit  $\lambda$  (Lambda) bezeichnet. Die Wellenlänge nehmen wir als Farbe wahr.

Der für das menschliche Auge sichtbare Bereich liegt zwischen 380 Nanometern (violett) und 750 Nanometern (dunkelrot). Die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes ist also kleiner als ein Tausendstel Millimeter. Weißes Licht ist zusammengesetzt aus allen Farben des sichtbaren Spektrums, während farbiges Licht nur Anteile von bestimmten Wellenlängen hat (Abb. 2.35).

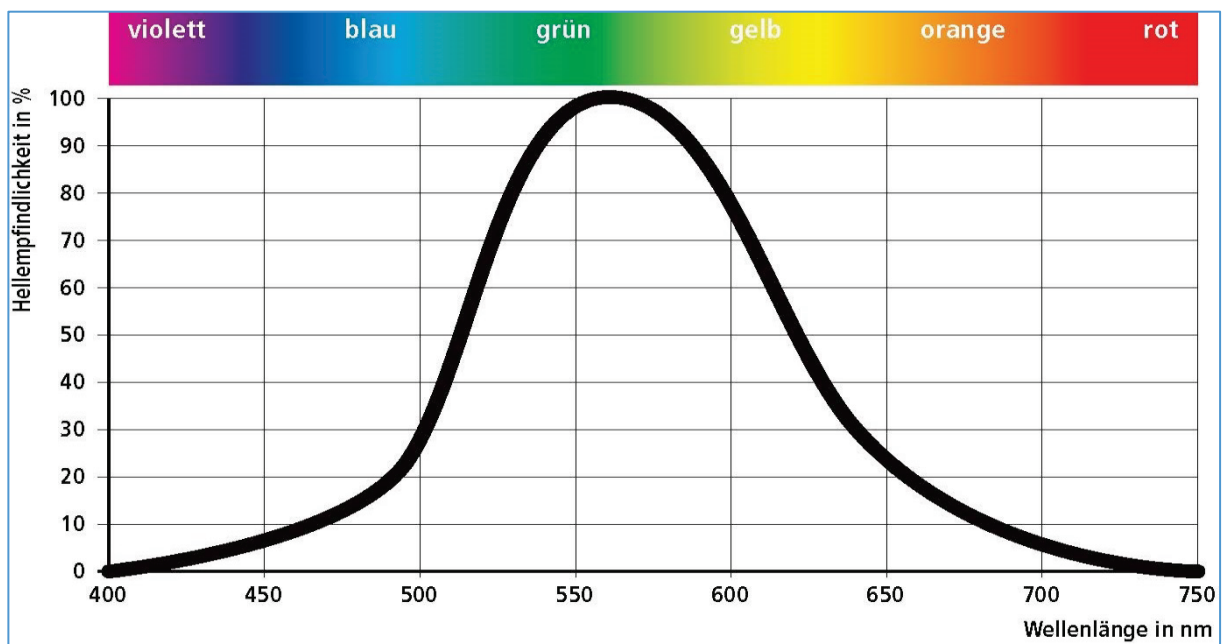


Abb. 2.35: Farbe des für das menschliche Auge sichtbaren Lichts als Funktion der Wellenlänge

Der sichtbare Teil des elektromagnetischen Spektrums stellt dabei nur einen sehr kleinen Ausschnitt aus dem gesamten elektromagnetischen Spektrum dar. Elektromagnetische Wellen mit kleinerer Wellenlänge (z. B. UV-Strahlung) oder mit größerer Wellenlänge (z. B. Infrarotstrahlung) können vom Auge nicht wahrgenommen werden. Im Vakuum und in der Luft breiten sich elektromagnetische Wellen mit einer Geschwindigkeit von etwa 300.000 Kilometern pro Sekunde aus.

Häufig wird im Zusammenhang von elektromagnetischen Wellen auch von elektromagnetischer Strahlung gesprochen, was aber dasselbe meint. Unter Strahlung versteht man ganz allgemein die Ausbreitung von Wellen oder Teilchen. Dabei wird Energie übertragen, die sich zum Beispiel bei der Infrarotstrahlung in Form von Wärme bemerkbar macht (siehe Kap. 2.2, Seite 15).

## Lichtquelle, Lampe und Leuchte

Als Lichtquellen werden ganz allgemein Orte bezeichnet, von denen Licht ausgeht. Es wird zwischen natürlichen Lichtquellen (zum Beispiel die Sonne) und künstlichen technischen Lichtquellen (Lampen) unterschieden. Die Begriffe Lampe, Leuchte und Leuchtmittel werden in der Umgangssprache häufig gleichgesetzt. Lampe und Leuchte sind aber laut DIN 5039<sup>42</sup> klar voneinander abgegrenzt, und der Begriff Leuchtmittel kommt in der Normung gar nicht vor. Mit Lampe ist laut DIN 5039 die technische Ausführung einer künstlichen Lichtquelle gemeint, die durch Energieumwandlung Licht erzeugt. Die Art der Lampe kann durch Zusätze präzisiert werden, also z. B. Glühlampe, Petroleumlampe, Leuchtstofflampe oder Energiesparlampe. Im Handel wird häufig der Begriff Leuchtmittel verwendet, unter dem die verschiedenen Lampenarten zusammengefasst werden.

Als Leuchte wird in DIN 5039 eine Vorrichtung beschrieben, die zur Befestigung, der Versorgung und dem Schutz der Lampe und zur Verteilung seines Lichtes dient. Die Befestigung und Versorgung der Lampe wird häufig durch standardisierte Sockel ermöglicht, wie z. B. mit der Glühlampen-Sockelform E14 und E27.

## Thermische und nichtthermische Strahler

Lichtquellen lassen sich in thermische und nichtthermische Strahler unterscheiden. Thermische Strahler, auch Temperaturstrahler genannt, liefern ein kontinuierliches Spektrum, also Strahlung, die alle Wellenlängen enthält. Das Maximum der ausgesendeten Strahlung verschiebt sich in Abhängigkeit von der Temperatur von langen nach kurzen Wellenlängen, wodurch sich der Farbeindruck von Rot hin zu Weiß verschiebt. Dies lässt sich z. B. sehr schön bei rotglühender Grillkohle beobachten, die durch das Zuführen von frischer Luft deutlich heißer wird und dabei weiß aufglüht. Je heißer ein Körper wird, desto größer ist außerdem auch der Anteil an sichtbarem Licht. Unabhängig davon wird jedoch ein großer Teil der zugeführten Energie von einem thermischen Strahler im nicht sichtbaren Bereich abgestrahlt, so dass die Lichterzeugung nicht sehr effizient ist. Daher werden thermische Lichtquellen mehr und mehr durch nichtthermische Lichtquellen ersetzt.

Nichtthermische Lichtquellen erzeugen Licht nach dem Prinzip der Lumineszenz. Dabei werden die Bestandteile eines Stoffes (Atome oder Moleküle) durch die Zufuhr von Energie in einen angeregten Zustand versetzt. Wenn sie dann in den Grundzustand zurückfallen, geben sie einen Teil der zugeführten Energie in Form von Licht wieder ab. Die Anregungsenergie kann elektrisch zugeführt werden, wie das z. B. bei Leuchtstofflampen oder Licht-emittierenden Dioden (Light-Emitting Diode, LED) der Fall ist, oder auch chemisch, was sich z. B. Glühwürmchen zunutze machen.

---

<sup>42</sup> DIN 5039:1995-09 - Licht, Lampen, Leuchten - Begriffe, Einteilung.



Da hier immer nur Licht mit bestimmten Wellenlängen abgestrahlt wird, wird die Energie sehr viel effizienter genutzt. Der Nachteil ist allerdings, dass immer nur einzelne Wellenlängen (also Farben) erzeugt werden. Weißes Licht, das für einen natürlichen Farbeindruck notwendig ist, kann nur durch die Kombination verschiedener Lichtquellen erzeugt werden.

### **Messgrößen für Licht**

In der praktischen Anwendung von Licht reichen die Angaben zur Wellenlänge (Farbe) und Amplitude (Helligkeit) nicht aus, um eine Beleuchtungssituation ausreichend beschreiben zu können. So zeigt z. B. die alltägliche Erfahrung, dass in der Regel nur ein Teil des Lichts an der gewünschten Stelle ankommt, das vorher die Lichtquelle verlassen hat. Auch Anzahl und Anordnung der Lichtquellen haben einen großen Einfluss auf die Beleuchtungssituation. Folgende Messgrößen werden üblicherweise in der Lichttechnik genutzt.

### **Lichtstrom**

Der Lichtstrom in der Einheit Lumen (lm) gibt an, wieviel Strahlungsenergie in Form von sichtbarem Licht die Lichtquelle verlässt. Dabei wird durch diese Einheit berücksichtigt, dass das menschliche Auge Licht unterschiedlicher Wellenlängen (Farben), aber gleicher Intensität nicht als gleich hell empfindet.

Diese spektrale Hellempfindlichkeit hängt stark von der Wellenlänge ab. Die größte Empfindlichkeit hat das menschliche Auge bei einer Wellenlänge von 555 Nanometern, was einem Hellgrün entspricht. Zum roten und blauen Rand des sichtbaren Spektrums nimmt die Empfindlichkeit deutlich ab. Dass das menschliche Auge die größte Empfindlichkeit bei einer Wellenlänge von 555 Nanometern hat, hängt übrigens damit zusammen, dass das genau dem Strahlungsmaximum der Sonne entspricht, die ein thermischer Strahler mit einer Oberflächentemperatur von etwa 5.600 °C ist.

Inzwischen ist auf allen Lampen die Angabe des Lichtstroms in Lumen zu finden. Die Angabe der Leistungsaufnahme, wie man das noch bei klassischen Glühlampen kennt, reicht bei der Vielzahl der unterschiedlichen Lampentypen nicht mehr aus, um die Helligkeit einer Lampe beurteilen zu können. Für den Ersatz alter Glühlampen durch effizientere Lichtquellen kann aber als grober Richtwert die Abschätzung dienen, dass bei einer Glühlampe das Verhältnis der Leistungsaufnahme in Watt zum Lichtstrom in Lumen ungefähr 1 zu 10 ist. Eine 60 Watt-Glühlampe erzeugt also ungefähr einen Lichtstrom von 600 Lumen.

### **Lichtstärke**

Die Lichtstärke in der Einheit Candela (cd) gibt an, wieviel Licht in eine bestimmte Richtung abgestrahlt wird. Bei gleichem Lichtstrom ist daher die Lichtstärke umso

größer, je stärker das Licht gebündelt ist. Die Einheit Candela (lateinisch für Kerze) nimmt Bezug auf frühere Lichteinheiten, die auf dem Licht bestimmter Standardkerzen basierten. Eine gewöhnliche Haushaltskerze hat eine Lichtstärke von etwa einem Candela (1 cd). Die Verteilung der Intensität einer Leuchte kann über Lichtstärkeverteilungskurven (LVK) dargestellt werden.

## Leuchtdichte

Die Leuchtdichte in der Einheit Candela pro Quadratmeter ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) gibt an, wieviel Licht aus einer Fläche austritt bzw. von ihr reflektiert wird. Je höher die Leuchtdichte, desto stärker blendet eine Lichtquelle. Moderne Lichtquellen (z. B. LED-Lampen) können dabei Leuchtdichten erreichen, die für das menschliche Auge gefährlich sein können. Leuchtdichten verschiedener Lichtquellen zeigt Tab. 2.16.

Tab. 2.16: Leuchtdichte verschiedener natürlicher und technischer Lichtquellen in  $\text{cd}/\text{m}^2$

Lichtquelle	Leuchtdichte	Lichtquelle	Leuchtdichte
Nachthimmel klar	0,001	Leuchtstofflampe kaltweiß	11.000
Mondoberfläche	2.500	Glühlampe (60 W, matt)	120.000
klarerer Himmel	8.000	Natriumdampf Lampe	5.000.000
Mittagssonne	1.600.000.000	weiße LED	50.000.000

Für eine blendfreie Beleuchtung empfiehlt es sich daher, das Licht über eine möglichst große Fläche abzustrahlen (Flächenstrahler) oder indirekt zu beleuchten.

## Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke in der Einheit Lux (lx) gibt an, wieviel Strahlungsenergie in Form von sichtbarem Licht auf eine Fläche trifft. Während also weiter oben nur die Einheiten betrachtet werden, die sich auf die Lichtquelle beziehen, wird hier eine Angabe darüber gemacht, wieviel Licht am betrachteten Ort ankommt. Die Beleuchtungsstärke von einem Lux entspricht dabei einem Lichtstrom von einem Lumen, der auf eine Fläche von einem Quadratmeter fällt (Abb. 2.36). Tab. 2.17 zeigt eine Übersicht zu den nach DIN EN 12464-1<sup>43</sup> empfohlenen Beleuchtungsstärken in der Gemeinschafts- und Individualgastronomie.

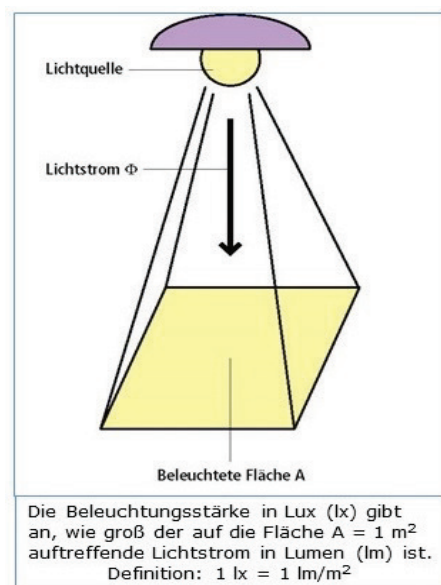


Abb. 2.36: Lichtquelle, Lichtstrom und Beleuchtungsstärke

<sup>43</sup> DIN EN 12464-1: 2011-08 Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen.

Tab. 2.17: Empfohlene Beleuchtungsstärken in Lux nach DIN EN 12464-1

Empfohlene Beleuchtungsstärke	Innenraum, Sehaufgabe, Tätigkeit	Spezifische Bedingungen
100 Lx	Flure	Während der Nacht ist ein geringeres Niveau zulässig.
200 Lx	Selbstbedienungsrestaurants	
300 Lx	Empfangstheke, Kassentheke, Portiertheke	
300 Lx	Buffet	
500 Lx	Küchen	Es sollte eine Übergangszone zwischen Küche und Restaurant geben.
500 Lx	Konferenzräume	Die Beleuchtung sollte regelbar sein, z. B. für Beamernutzung.
Nicht vorgegeben	Restaurants, Speiseräume, Funktionsräume	Die Beleuchtung sollte so gestaltet sein, dass eine angemessene Atmosphäre geschaffen wird.

Das menschliche Auge kann sich über einen sehr weiten Bereich an unterschiedliche Beleuchtungsstärken anpassen (Adaption). So können im Juli in der Mittagssonne im Freien über 100.000 Lux erreicht werden, während bei klaren Vollmondnächten die Beleuchtungsstärke gerade mal ein Viertel Lux beträgt (Tab. 2.19, Seite 92). Diese Anpassung der Augen braucht aber Zeit, was sich bei starken Helligkeitswechseln (vom dunklen Raum nach draußen bei wolkenlosem Himmel zur Mittagszeit und umgekehrt) unangenehm bemerkbar machen kann.

Für die Erkennbarkeit von Details und einer möglichst naturgetreuen Farbwahrnehmung ist eine ausreichende Beleuchtungsstärke entscheidend. Daher werden entsprechende Beleuchtungsstärken für bestimmte Tätigkeiten und Arbeitsplätze empfohlen. Eine ausreichende Beleuchtungsstärke ist auch aus arbeitsphysiologischen Gründen sehr wichtig, denn die Ermüdung, die Fehlerquote und die Häufigkeit von Arbeitsunfällen nehmen bei höherer Beleuchtungsstärke erheblich ab.

### Lichtausbeute

Die Lichtausbeute in der Einheit Lumen pro Watt (lm/W) gibt an, wie effizient eine Lichtquelle die aufgenommene Energie in Licht umsetzt. Sie ist damit ein Maß für den Wirkungsgrad einer Lampe. Die Lichtausbeute einzelner Lampentypen ist unterschiedlich (siehe Tab. 2.18). Allgemein lässt sich sagen, dass nichtthermische Strahler (Gasentladungslampen, LED-Lampen) deutlich effizienter als thermische Strahler (Glühlampen) sind.

Tab. 2.18: Lichtausbeute ausgewählter Lampen in lm/W

Lichtquelle	Lichtausbeute	Lichtquelle	Lichtausbeute
Glühlampe 230 V, 25 W	8	Halogen, 230 V, 50 W	12
Glühlampe 230 V, 60 W	12	Leuchtstofflampe, 11 W	49
Glühlampe 230 V, 100 W	14,5	Leuchtstofflampe, 70 W	75
Halogen 12 V, 35 W	25	LED weiß, 5 W	65

## Farbtemperatur

Die Farbtemperatur in der Einheit Kelvin (K) gibt den Farbeindruck einer Lichtquelle an. Sie entspricht grob der Oberflächentemperatur eines thermischen Strahlers. Dementsprechend hat die Mittagssonne eine Farbtemperatur von 5.500 – 5.800 K, eine Glühlampe ungefähr 2.700 K und eine Kerzenflamme etwa 1.500 K. Je niedriger die Farbtemperatur, umso rötlicher wird der Farbeindruck und je höher die Farbtemperatur, umso blauer.

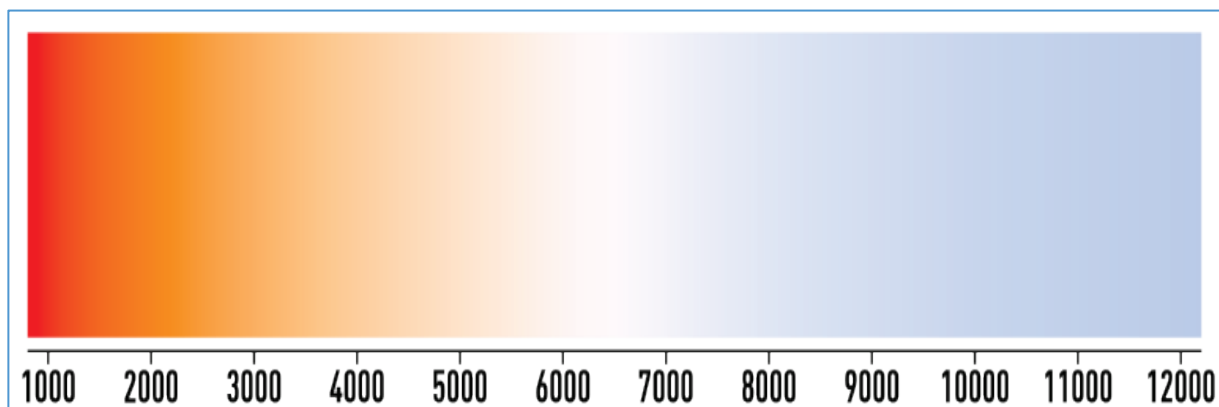


Abb. 2.37: Farbe als Funktion der Farbtemperatur in Kelvin (© Bhutajata auf creativecommons.org)

Bei Lampen dient die Farbtemperatur der Einteilung in drei Gruppen. Warmweiße Lichtquellen mit Farbtemperaturen unter 3.300 K senden ein gelbweißes Licht aus (ähnlich wie eine Glühlampe), das als angenehm und gemütlich empfunden wird. Neutralweiße Lichtquellen haben Farbtemperaturen von 3.300 - 5300 K und senden weißes Licht aus, das eine sachliche Atmosphäre unterstützt. Tageslichtweiße Lichtquellen haben Farbtemperaturen über 5.300 K und eignen sich damit gut für eine neutrale Farbwiedergabe, allerdings wird das Licht eher als kühl und unangenehm empfunden.

## Farbwiedergabeindex

Der Farbwiedergabeindex Ra (Referenzindex<sub>allgemein</sub>) macht eine Aussage über die Farbwiedergabequalität und gibt an, wie gut eine künstliche Lichtquelle Farben im Vergleich zu natürlichem Sonnenlicht wiedergibt. Dabei entspricht ein Index von 100 einer optimalen Farbwiedergabe. Eine möglichst naturgetreue Farbwiedergabe ist bei der Verarbeitung von Lebensmitteln sehr wichtig.

Die Körperfarbe, also der Farbeindruck einer Oberfläche entsteht durch die Kombination aus reflektierten und absorbierten Anteilen farbigen Lichtes. Wird z. B. eine blaue Oberfläche mit weißem Licht beleuchtet, dann wird der blaue Anteil im weißen Licht von der Oberfläche reflektiert, während alle anderen Farbanteile absorbiert werden. Wird die Oberfläche stattdessen mit Licht ohne Blauanteil beleuchtet, beispielsweise von der orange leuchtenden Straßenbeleuchtung, wird der Farbeindruck völlig verfälscht.

Eine optimale Farbwiedergabe, also die naturgetreue Farbdarstellung aller Farben, kann daher nur erreicht werden, wenn die beleuchtende Lichtquelle ein tageslichtähnliches Spektrum hat, das alle Spektralfarben in der richtigen Intensität enthält. Aktuelle Leuchtstoff- und LED-Lampen erreichen einen Farbwiedergabeindex von bis zu 98.

### Kriterien guter Beleuchtung

Eine gute Beleuchtungsanlage muss eine ganze Reihe von Kriterien erfüllen. Zunächst muss ein angemessenes Beleuchtungsniveau gewährleistet sein. Insbesondere an den Arbeitsplätzen sollte die Beleuchtungsstärke den Empfehlungen entsprechen. Als Lichtfarbe sollte im Arbeitsbereich neutral- oder sogar tageslichtweiß gewählt werden, um eine hohe Farbwiedergabequalität zu erreichen und einer Ermüdung vorzubeugen. Eine angemessene Schattigkeit erleichtert das Erkennen räumlicher Strukturen und unterstützt damit das Tiefensehen und die Orientierung. Richtige Schattenbildung entsteht durch die Kombination von gerichtetem und diffusem (ungerichtetem) Licht. Bei der Lichtrichtung sind störende Reflexe auf Arbeitsflächen, Schreib- und Lesematerialien oder Bildschirmen zu vermeiden.

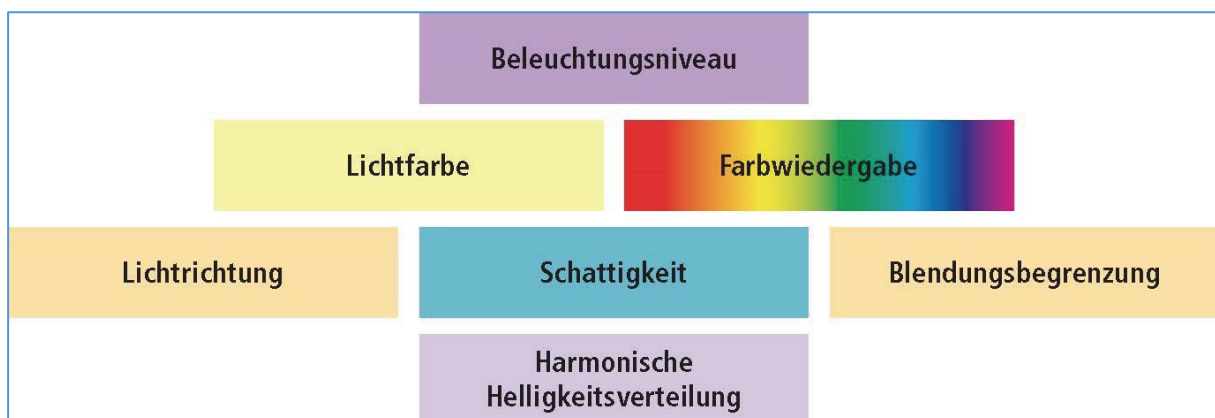


Abb. 2.38: Kriterien guter Beleuchtung

Alle Lichtquellen müssen über eine Blendungsbegrenzung verfügen, damit sie nicht als störend empfunden werden. Im gesamten Arbeitsbereich sollte eine möglichst gleichmäßige Ausleuchtung angestrebt werden, um starke Hell-/Dunkelkontraste zu vermeiden. Abrupte Helligkeitsunterschiede beeinträchtigen Sehleistung, da das Auge für die Adaption etwas Zeit benötigt und tragen außerdem zur Ermüdung bei. Gute Beleuchtung rechnet sich stets; nicht nur die Arbeitsergebnisse werden besser, sondern auch der Eindruck von Frische und Hygiene wird gefördert.



## Arten von Lampen

### Thermische Strahler

- **Glühlampen und Halogenlampen**

Elektrische Glühlampen stellen „Temperaturstrahler“ dar, die die zugeführte Energie im Wesentlichen als Wärmestrahlung abgeben. Nur etwa 3 % der zugeführten elektrischen Energie werden in sichtbares Licht umgesetzt. Das Prinzip ist einfach: In einem gläsernen Lampenkolben fließt Strom durch eine Drahtwendel aus einem Metall mit hohem Schmelzpunkt. Dafür wird eine Legierung aus Osmium und Wolfram verwendet. Die Wendel wird zur Weißglut erhitzt. Je höher die Wendeltemperatur, desto größer sind Strahlungsleistung und Lichtausbeute. Zugleich sinkt jedoch die Lebensdauer der Lampe. Als Kompromiss werden etwa eintausend Betriebsstunden angestrebt. Damit der Glühfaden nicht sofort verbrennt, ist der Glaskolben mit Stickstoff oder Argon gefüllt.



Halogenlampen erreichen mit rund 4 % einen etwas höheren Wirkungsgrad, da die Wendeltemperatur wenige hundert Grad Celsius höher ist als bei normalen Glühlampen. Um trotz der höheren Wendeltemperatur eine ähnliche Lebensdauer wie bei einer normalen Glühlampe zu erreichen, wird dem Füllgas ein Halogenzusatz (Jod oder Brom) beigemischt. Die Halogenatome gehen mit den abgedampften Metallatomen eine Verbindung ein und halten sie in der Gasphase.

An der dünnsten Stelle der Glühwendel, wo es besonders heiß ist, wird die Halogenverbindung wieder aufgespalten und das Metall dort abgelagert. Die Lampenkolben von Halogenlampen sind sehr klein gebaut, damit sie eine Temperatur von über 200 °C erreichen. Dies soll verhindern, dass sich die Halogenverbindung am Lampenkolben niederschlägt und diesen von Innen schwärzt.

Durch die EU-Verordnungen 244/2009<sup>44</sup> und 1194/2012<sup>45</sup>, die den Energieverbrauch von Lampen mit ungebündeltem und gebündeltem Licht (Reflektorlampen) regeln, sind Mindestanforderungen an die Energieeffizienz von Lampen festgelegt.

---

<sup>44</sup> Verordnung EG 244/2009 vom 18.03.2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht.

<sup>45</sup> Verordnung EG 1194/2012 vom 12.12.2012 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lampen mit gebündeltem Licht, LED-Lampen und dazugehörigen Geräten.

Lampen, die diese Energieeffizienz nicht erreichen, dürfen in der EU weder hergestellt noch importiert werden. Seit 2018 sind alle Stufen der Verordnungen gültig, was faktisch das Aus für fast alle Glüh- und Halogenlampen bedeutet, da sie aufgrund ihrer geringen Effizienz nicht die Mindestanforderungen erfüllen. Vorhandene Lampen dürfen aber weiterhin benutzt werden.

### **Nichtthermische Strahler**

Nichtthermische Strahler, auch Lumineszenzstrahler genannt, finden inzwischen in so gut wie allen Beleuchtungssituationen Anwendung. Insbesondere die rasante Entwicklung in der LED-Technologie hat dazu beigetragen, dass neben klassischen Leuchten auch völlig neue Lichtdesigns umgesetzt werden können. Ihre großen Vorteile sind die effizientere Lichterzeugung, die damit einhergehende geringere Erwärmung und die deutlich größere Lebensdauer. Nachteilig war lange Zeit die schlechte Farbwiedergabe. Für Beleuchtungszwecke angewendete Lumineszenzstrahler basieren überwiegend auf dem Prinzip der Gasentladung (Leuchtstofflampe) oder der Elektrolumineszenz (z. B. LED).

### **Gasentladungslampen**

Gasentladungslampen gibt es schon fast so lange wie Glühlampen. Erste Anwendung fanden Gasentladungslampen als Neonröhren in der Leuchtreklame. Für Beleuchtungszwecke werden allerdings überwiegend Leuchtstofflampen und Hochdruckentladungslampen eingesetzt.

- **Leuchtstofflampen**

Leuchtstofflampen sind Gasentladungslampen, bei denen Quecksilberdampf unter niedrigem Druck mit Hilfe von elektrischem Strom zum Leuchten angeregt wird. Unter diesen Bedingungen strahlt das gasförmige Quecksilber vor allen Dingen UV-Strahlung ab, die für das menschliche Auge nicht sichtbar ist. An der Innenwand des Lampenrohrs befindet sich die namensgebende Leuchtstoffschicht, die die UV-Strahlung absorbiert und als sichtbares Licht wieder abstrahlt. Durch die Kombination verschiedener Leuchtstoffe kann die Farbtemperatur eingestellt werden. Man unterscheidet zwischen Heißkathodenlampen, also den Leuchtstofflampen im engeren Sinne, und Kaltkathodenlampen, die z. B. für Leuchtreklame oder die Hintergrundbeleuchtung von LCD-Bildschirmen verwendet werden.



© Stux auf pixabay

Leuchtstofflampen dürfen nur mit einem Vorschaltgerät betrieben werden, das häufig fest in der Leuchte verbaut ist. Das Vorschaltgerät hat die Aufgabe, die Gasentladung in der Lampe zu starten und anschließend den fließenden Strom zu begrenzen, um eine Zerstörung der Lampe zu verhindern.

Konventionelle Vorschaltgeräte (KVG), häufig auch als verlustarme Vorschaltgeräte (VVG) bezeichnet, starten die Gasentladung nach einem sekundenlangen Vorglühen der Elektroden im Innern der Lampe, so dass jeder Schaltvorgang die Lebensdauer der Lampe reduziert. Außerdem lassen sie die Lampen mit einer Frequenz von 100 Hertz flimmern. Auch wenn dieses Flimmern bewusst kaum wahrnehmbar ist, kann es störend sein, insbesondere bei der Beleuchtung von rotierenden Objekten.

Konventionelle Vorschaltgeräte werden nach und nach durch elektronische Vorschaltgeräte (EVG) ersetzt, die ohne Vorglühen und fast verzögerungsfrei die Gasentladung starten und somit die Lebensdauer nicht beeinträchtigen. Ein weiterer Vorteil ist, dass die elektronischen Vorschaltgeräte eine flimmerfreie Beleuchtung ermöglichen. Der Wirkungsgrad von Leuchtstofflampen ist mit über 20 % etwa fünfmal so hoch wie bei einer Glühlampe, die Lebensdauer ist ungefähr zehnmal größer.

Leuchtstofflampen enthalten Quecksilber, ein giftiges Schwermetall, das bereits bei Zimmertemperatur Dämpfe abgibt. Defekte Leuchtstofflampen müssen daher als Sondermüll entsorgt werden. Bei der Entsorgung ist darauf zu achten, dass der Lampenkörper nicht beschädigt wird. Bei einem Bruch des Lampenkörpers sollte das ausgelaufene Quecksilber eingesammelt (z. B. mit zwei Papierbögen) und ausreichend gelüftet werden. Das Quecksilber muss als Sondermüll entsorgt werden.

- **Kompaktleuchtstofflampen**

Kompaktleuchtstofflampen, häufig auch als Energiesparlampen bezeichnet, sind Leuchtstofflampen, die speziell für den Ersatz von Glühlampen angeboten werden. Sie haben daher ähnliche Abmessungen wie Glühlampen, einen klassischen Schraubsockel und ein in der Lampe fest eingebautes elektronisches Vorschaltgerät.

Das Lampenrohr ist sehr viel dünner als bei einer Röhrenleuchte und wendelförmig aufgebaut. Die Lichtausbeute hängt von der Temperatur ab, die sich im Lampenrohr einstellt, sodass sich die volle Leuchtkraft erst nach einiger Zeit einstellt.



© J. Diermaier auf pixabay

Dieser Umstand wurde besonders bei den ersten Lampengenerationen als sehr störend empfunden. Spätere Lampengenerationen weisen zwar deutlich kürzere Zeiten bis zur vollen Leuchtkraft auf, dennoch eignet sich dieser Lampentyp nach wie vor nicht für Beleuchtungsanwendungen mit kurzer Betriebszeit wie z. B. Treppenhausbeleuchtungen. Auch Kompaktleuchtstofflampen enthalten Quecksilber und sind daher Sondermüll. Inzwischen sind Kompaktleuchtstofflampen weitestgehend durch LED-Lampen verdrängt worden.

- **Hochdruckentladungslampen**

Hochdruckentladungslampen sind Gasentladungslampen, in denen ein Metallampf zum Leuchten gebracht wird. Der Aufbau und das Prinzip sind sehr ähnlich zu einer Leuchtstofflampe, allerdings findet die Gasentladung unter höherem Druck statt und auf einen Leuchtstoff kann verzichtet werden. Für industrielle Beleuchtungszwecke, bei denen es auf eine gute Farbwiedergabe nicht ankommt, werden häufig Quecksilberdampf-Hochdrucklampen eingesetzt, die sich durch ihre blaugrüne Lichtfarbe auszeichnen. Für den Einsatz in gewerblichen Küchen kommen diese Lampen daher eher nicht in Frage.

- **Sonderlampen**

Neben den hier aufgeführten Gasentladungslampen gibt es eine Vielzahl weiterer Lampentypen für spezielle Anwendungsfälle, die ebenfalls auf dem Prinzip der Gasentladung basieren und zum Teil extrem hohe Lichtausbeuten haben. Diese Lampen eignen sich aber in der Regel nicht für die Beleuchtungsanforderungen in gewerblichen Küchen. Als Beispiel seien hier die Natrium-Niederdruckdampflampe genannt, die mit ihrem gelben Licht häufig zur Straßenbeleuchtung eingesetzt wird, oder Xenon-Gasentladungslampen, die z. B. in Beamern oder Kraftfahrzeugen eingesetzt werden.

## **Leuchtdioden (LED)**

Leuchtdioden (LED: Light-Emitting Diode) haben seit den ersten Prototypen in den 1950er Jahren eine bemerkenswerte Entwicklung erlebt. Mit der Entwicklung blauer Leuchtdioden – vorher gab es nur rot, gelb, grün – ist es seit den 1990er Jahren auch möglich, weißes Licht zu erzeugen.

Parallel dazu konnte die Lichtausbeute immer weiter gesteigert werden, während der Preis stetig gesunken ist. Handelsübliche LED-Lampen erreichen heute Lebensdauern von 30.000 Stunden und bessere Lichtausbeuten als Leuchtstofflampen. Leuchtdioden sind daher inzwischen in fast allen Anwendungsbereichen eine gute Alternative zu klassischen Lampen.

Leuchtdioden entsprechen in ihrem prinzipiellen Aufbau einer Halbleiterdiode und besitzen daher auch sehr ähnliche elektrische Eigenschaften. Sie werden in Durchlassrichtung betrieben, wobei die verwendeten Halbleitermaterialien durch den fließenden Strom zum Leuchten angeregt werden. Das Prinzip ist dabei ähnlich wie in einer Gasentladung, nur das in diesem Fall ein Festkörper leuchtet. Durch die Kombination verschiedener Materialien können verschiedene Farben erzeugt werden, wobei Leuchtdioden immer nur eine Farbe abstrahlen.

Inzwischen werden Leuchtdioden im gesamten sichtbaren Spektrum angeboten, und darüber hinaus auch LED, die infrarotes (z. B. bei Fernbedienungen) oder ultraviolette Licht (Schwarzlicht) abgeben. Farbige und weißes Licht lässt sich durch die Kombination von drei Leuchtdioden mit den Grundfarben Rot, Grün und Blau erreichen.

Wenn nur weißes Licht benötigt wird, reicht häufig die preiswertere Kombination von einer blauen Leuchtdiode mit einem gelben Leuchtstoff aus. Ein Teil des blauen Lichtes wird vom Leuchtstoff in ein überwiegend gelb erscheinendes Licht umgewandelt, das in Kombination mit dem blauen Licht dann einen weißen Licht-eindruck ergibt.

Leuchtdioden arbeiten bei sehr niedrigen Betriebsspannungen und brauchen daher für ihren Betrieb elektronische Vorschaltgeräte, die je nach Bauform bereits in der Lampe integriert sein können. LED-Lampen gibt es in klassischen Bauformen mit eingebautem Vorschaltgerät, in denen sie als Retrofits herkömmliche Lampen ersetzen. Das Retrodesign kann dabei so weit gehen, dass sogar der Glühfaden einer herkömmlichen Glühlampe nachgebildet wird.

Darüber hinaus gibt es z. B. mit den RGB-LED-Strips völlig neue und flexible Möglichkeiten der Beleuchtung, da sich die Leuchtstreifen flexibel verlegen lassen und ein breites Spektrum an Farben abstrahlen können. Die dafür benötigten Vorschaltgeräte lassen sich in der Regel an unauffälliger Stelle installieren.

LED-Leuchtmittel sind aufgrund ihres einfachen Aufbaus sehr robust. Sie enthalten kein Quecksilber oder andere giftige Stoffe, die bei einer Beschädigung freigesetzt werden könnten. Defekte LED-Lampen zählen zu den Elektroaltgeräten und dürfen daher nicht in den Restmüll, sondern müssen bei entsprechenden Sammelstellen abgegeben werden.

## **Leuchten**

Bei gewerblichen Küchen liegt der Anteil der Beleuchtung am gesamten Stromverbrauch bei unter 10 %. Dennoch macht es Sinn, defekte Lampen durch sparsamere und langlebigere LED-Lampen zu ersetzen. Inzwischen gibt es eine große Auswahl an Retrofits, so dass für fast alle Anwendungen geeignete LED-Ausführungen zur Verfügung stehen.



Beim Austausch der defekten Lampen sollte darauf geachtet werden, dass die neuen Lampen einen ähnlichen Lichtstrom mit der passenden Farbtemperatur abgeben.

Tab. 2.19: Typische Beleuchtungsstärken im Alltag

Situation	Beleuchtungsstärke
Klarer Himmel und Sonne im Zenit	130.000 lx
5 mW Laserpointer, rot (635 nm), 3 mm Strahldurchmesser	105.000 lx
Klarer Himmel (Mitteleuropa mittags im Sommer)	90.000 lx
Klarer Himmel (Mitteleuropa mittags im Winter)	20.000 lx
Bedeckter Himmel (Mitteleuropa mittags im Sommer)	19.000 lx
Im Schatten im Sommer	10.000 lx
Bedeckter Wintertag	3.500 lx
Beleuchtung TV-Studio	1.000 lx
Dämmerung (Sonne knapp unter Horizont)	750 lx
Büro-/Zimmerbeleuchtung	500 lx
Flurbeleuchtung	100 lx
Wohnzimmer	50 lx
Straßenbeleuchtung	10 lx
Kerze ca. 1 Meter entfernt	1 lx
Vollmondnacht	0,05 – 0,36 lx

Neue Beleuchtungsanlagen oder deren Erweiterung werden von Fachleuten mit Softwareunterstützung geplant, die die Helligkeitsverteilung im Raum simuliert. Dadurch kann auch sichergestellt werden, dass die vorgegebenen Beleuchtungsstärken überall tatsächlich erreicht werden.

Je nach Raum und Tätigkeit ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Beleuchtungssituation. Laut DIN EN 12464-1 soll beispielsweise in Küchenräumen die Beleuchtungsstärke mindestens 500 Lux betragen, ein Buffet muss mit mindestens 300 Lux beleuchtet werden (siehe Tab. 2.17, Seite 84).

Neben der ausreichenden Helligkeit, die das plastische Erkennen von Formen und Strukturen unterstützt, spielt auch die Lichtfarbe eine wichtige Rolle. Im Küchenbereich ist eine möglichst hohe Farbwiedergabequalität für die objektive Beurteilung der Lebensmittel sehr wichtig, während bei der Speisenpräsentation durch die passende Lichtfarbe die Speisen in ein gutes Licht gerückt werden sollen. Denn unpassende Lichtfarben oder mangelnde Farbwiedergabe können den optischen Eindruck einer Speise ruinieren. Und schließlich ist auch eine Begrenzung der Blendung wichtig, so dass beim Arbeiten ein direkter Blick in die Lichtquelle verhindert wird. Alternativ kann durch Flächenstrahler mit geringer Leuchtdichte eine Blendung vermieden werden.

Bei der Auswahl der Leuchten stellt die Reinigungsfreundlichkeit ein weiteres wichtiges Kriterium dar, da neben den Hygieneproblemen die Lichtausbeute durch Verschmutzung erheblich reduziert werden kann.

Zur richtigen Dimensionierung einer Beleuchtungsanlage für den gewerblichen Bereich gehört erhebliche Erfahrung – vor allem, wenn es um die richtige Präsentation und Beleuchtung von Lebensmitteln geht. Hier sollte in jedem Fall der fachkundige Rat von Spezialisten eingeholt werden.