

KG 434: Wie werden Energieeffizienz und Betriebskosten von Kälteanlagen bewertet?

1. Einordnung im Kontext der TGA-Planung

Kälteanlagen sind im Sinne der technischen Gebäudeausrüstung ein eigenständiges Anlagensegment zur Erzeugung, Verteilung und Nutzung von Kälte für Raumkühlung, Lüftungsanlagen oder technische Nutzungen. In der Kostengliederung nach DIN 276 werden sie regelmäßig der Kostengruppe 434 zugeordnet. Aus planerischer Sicht umfasst dies nicht nur den Kälteerzeuger, sondern auch hydraulische Netze, Rückkühlung, Regelung, Nebenaggregate und sicherheitstechnische Einrichtungen.

Die Bedeutung der Kältetechnik für den Energiebedarf eines Gebäudes ist erheblich. In vielen Nichtwohngebäuden bestimmen Kühlbedarf, Betriebszeiten und Systemtemperaturen einen wesentlichen Teil des elektrischen Endenergieverbrauchs. Daraus folgt unmittelbar, dass die Bewertung einer Kälteanlage nicht allein über die installierte Leistung oder die Anschaffungskosten erfolgen kann. Maßgeblich ist vielmehr, wie effizient die Anlage unter realen Betriebsbedingungen arbeitet und welche Kosten über die gesamte Nutzungsdauer entstehen.

Dabei ist zwischen **Investitionskosten** und **Lebenszykluskosten** zu unterscheiden. Die Investitionskosten umfassen die einmaligen Aufwendungen für Beschaffung, Einbau und Inbetriebnahme. Die Lebenszykluskosten berücksichtigen zusätzlich Energieverbrauch, Wartung, Instandhaltung, Ersatzinvestitionen, Betriebsunterbrechungen und gegebenenfalls Entsorgung. Gerade bei Kälteanlagen können die Betriebskosten über den Nutzungszeitraum die Anfangsinvestition deutlich übersteigen.

Für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ist daher nicht die billigste, sondern die technisch und wirtschaftlich belastbarste Lösung maßgeblich. Eine Anlage mit niedriger Anfangsinvestition kann sich als nachteilig erweisen, wenn Teillastverhalten, Hilfsenergien oder Wartungsaufwand ungünstig sind. Umgekehrt kann eine höhere Investition sachgerecht sein, wenn sie dauerhaft zu niedrigeren Betriebs- und Folgekosten führt.

2. Grundlagen der energetischen Bewertung

Die energetische Bewertung von Kälteanlagen stützt sich auf mehrere Kennzahlen, die jeweils unterschiedliche Betriebszustände abbilden.

Die **Leistungszahl COP** beschreibt das Verhältnis zwischen abgegebener Kälteleistung und aufgenommener elektrischer Leistung unter definierten Bedingungen. Sie ist eine Punktbewertung für einen bestimmten Arbeitspunkt. Der COP eignet sich zur technischen Einordnung, bildet aber nicht den realen Jahresbetrieb ab, da Außentemperatur, Lastzustand und Systemtemperaturen im Betrieb laufend variieren.

Die **Energy Efficiency Ratio (EER)** wird in der Praxis ähnlich verwendet und beschreibt ebenfalls das Verhältnis von Kälteleistung zu elektrischer Leistungsaufnahme. Je nach Normen- und Gerätekontext wird zwischen COP und EER differenziert, in der planerischen Bewertung gilt jedoch gleichermaßen: Es handelt sich um Kennwerte für definierte Prüfbedingungen, nicht um eine Jahresbewertung.

Die **Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER)** dient der saisonalen Beurteilung über mehrere Teillastpunkte hinweg. Damit wird der reale Betrieb deutlich besser angenähert, weil Kälteanlagen den überwiegenden Teil der Zeit nicht bei Volllast, sondern in Teillastzuständen arbeiten. Der SEER ist deshalb für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen meist aussagekräftiger als ein einzelner Nennwert.

Das **Teillastverhalten** ist entscheidend, weil Kühlanlagen im Gebäude selten dauerhaft unter Auslegungslast betrieben werden. Ein System mit gutem Volllastwert, aber ungünstigem Regelverhalten im Teillastbereich, kann im Jahresbetrieb schlechter abschneiden als eine Anlage mit geringfügig schlechterem Nennwert, aber stabiler Modulation.

Ein wesentlicher Einflussfaktor ist die **Außentemperatur**. Mit steigender Außentemperatur erhöht sich in vielen Systemen der Verflüssigungsdruck, was die Leistungsaufnahme der Verdichter steigert und die Effizienz senkt. Umgekehrt verbessern niedrigere Außentemperaturen häufig die Arbeitszahl und eröffnen unter bestimmten Bedingungen zusätzlich den Einsatz von Freikühlung.

Ebenfalls zentral sind die **Systemtemperaturen**, insbesondere Vorlauf- und Rücklauftemperaturen des Kaltwassersystems. Je höher die Kaltwassertemperaturen gewählt werden können, desto günstiger sind in der Regel die Betriebsbedingungen des Kälteerzeugers. Niedrige Vorlauftemperaturen erhöhen dagegen die thermodynamische Hubarbeit und verschlechtern die Effizienz.

Nennwerte bilden den realen Jahresbetrieb deshalb nicht ausreichend ab, weil sie weder die jahreszeitliche Streuung der Außentemperatur noch das Lastprofil, das Regelverhalten, die Hilfsenergien oder Betriebsunterbrechungen erfassen. Eine belastbare Bewertung muss daher den tatsächlichen Anlagenbetrieb über Zeit berücksichtigen.

3. Einfluss der Kühllast und Auslegung

Die energetische Qualität einer Kälteanlage beginnt nicht beim Kälteerzeuger, sondern bei der **Kühllastberechnung**. Nur wenn die tatsächliche Last bekannt ist, kann die Anlagendimensionierung technisch sinnvoll erfolgen. Fehler in der Kühllast führen unmittelbar zu Fehlentscheidungen bei Leistung, Hydraulik, Regelung und Wirtschaftlichkeit.

Eine häufige Fehlentwicklung ist die **Überdimensionierung**. Aus Sicherheitsdenken werden Anlagen oft mit zusätzlichen Reserven belegt, obwohl bereits Sicherheitszuschläge in den Berechnungsverfahren enthalten sind. Eine zu große Anlage erreicht ihre Nennleistung im Betrieb selten, schaltet häufiger ein und aus oder arbeitet über weite Strecken außerhalb ihres optimalen Wirkungsbereichs. Das führt zu **Taktbetrieb**, erhöhtem Verschleiß und ungünstigen Jahresarbeitszahlen.

Die **Gleichzeitigkeit** der Lasten ist planerisch besonders wichtig. Interne Lasten, solare Gewinne, technische Nutzungen und Lüftungslasten treten nicht immer gleichzeitig in voller Höhe auf. Wird diese Gleichzeitigkeit nicht sachgerecht berücksichtigt, entstehen überhöhte Auslegungsleistungen und damit unnötig große Investitionen und ineffiziente Betriebsweisen.

Ausschlaggebend sind außerdem die **Lastprofile**. Ein Bürogebäude mit ausgeprägter Tageslast, ein Hotel mit wechselnden Nutzungen oder ein Rechenzentrumsbereich mit nahezu konstanter Last stellen unterschiedliche Anforderungen an Verdichterregelung, Speicher, Freikühlung und Redundanz. Die gleiche installierte Leistung kann daher bei unterschiedlichen Lastprofilen zu sehr unterschiedlichen Betriebskosten führen.

Auch **Redundanz** beeinflusst die Effizienzbewertung. Redundante Systeme sind aus Verfügbarkeitsgründen häufig erforderlich, insbesondere bei kritischen Nutzungen. Energetisch sinnvoll sind sie jedoch nur, wenn sie modular, lastabhängig und regelungstechnisch abgestimmt eingebunden werden. Überzogene Redundanz ohne Lastabstimmung erhöht Investition, Stillstandsverluste und Hilfsenergien.

Die Auslegung beeinflusst damit nicht nur die Leistungsreserve, sondern unmittelbar den Stromverbrauch, die Zahl der Verdichterstarts, die Laufzeiten einzelner Komponenten und die Gesamtwirtschaftlichkeit.

4. Systemtechnische Einflussfaktoren

Die Energieeffizienz einer Kälteanlage wird wesentlich durch das Systemkonzept bestimmt.

Ein grundlegender Unterschied besteht zwischen **luftgekühlten** und **wassergekühlten Systemen**. Luftgekühlte Systeme sind konstruktiv einfacher und benötigen keine wasserführende Rückkühlung, arbeiten jedoch häufig mit höheren Verflüssigungstemperaturen, insbesondere bei hohen Außentemperaturen. Wassergekühlte Systeme können günstigere Wärmeabfuhrbedingungen aufweisen, erfordern aber zusätzliche Infrastruktur wie Rückkühlwerke, Wasserbehandlung und Pumpen.

Die **Freikühlung** ist ein wichtiger Effizienzbaustein. Sie nutzt niedrige Außenluft- oder Umgebungstemperaturen, um Kühlbedarf ganz oder teilweise ohne mechanische Kälteerzeugung zu decken. Ob Freikühlung wirtschaftlich sinnvoll ist, hängt von Klimastandort, Lastverlauf, erforderlichem Temperaturniveau und Betriebszeiten ab. Ihr Nutzen steigt mit höheren zulässigen Systemtemperaturen.

Rückkühlwerke beeinflussen den Stromverbrauch sowohl direkt als auch indirekt. Direkt über Ventilatoren, Pumpen und Wasserführung, indirekt über das erreichbare Temperaturniveau der Wärmeabfuhr. Eine ungünstige Auslegung des Rückkühlwerks kann die Effizienz des gesamten Systems verschlechtern, selbst wenn der Kälteerzeuger für sich genommen gute Kennwerte aufweist.

Die **Speicherintegration** kann Lastspitzen glätten, Taktbetrieb reduzieren und Betriebszeiten in günstigere Temperatur- oder Tarifphasen verlagern. Energetisch sinnvoll ist sie jedoch nur, wenn Speicherverluste, Regelstrategie und tatsächlicher Lastgang berücksichtigt werden. Ein Speicher ist kein Automatismus für mehr Effizienz.

Das **hydraulische Konzept** gehört zu den meist unterschätzten Einflussgrößen. Hydraulische Fehlanordnungen, zu geringe Spreizungen, fehlender Abgleich oder falsch platzierte Trennungen führen zu instabilen Volumenströmen und erhöhtem Pumpenaufwand. Die Folge sind höhere Hilfsenergien und schlechtere Nutzbarkeit der Kälteerzeugung.

Druckverluste im Rohrnetz und in Wärmeübertragern erhöhen den Leistungsbedarf der Pumpen. Gleiches gilt für hohe externe Widerstände in lufttechnischen Systemen, die den **Ventilatorstromverbrauch** steigern. Deshalb ist die Gesamtbewertung einer Kälteanlage immer eine Bewertung des Gesamtsystems aus Erzeugung, Verteilung, Übergabe und Regelung.

5. Betriebskostenanalyse

Die Betriebskostenanalyse betrachtet alle regelmäßig oder periodisch anfallenden Kosten während der Nutzungsdauer.

Der größte Kostenblock ist häufig der **Stromverbrauch**. Er umfasst nicht nur den Verdichterstrom, sondern auch Pumpen, Ventilatoren, Rückkühlwerke, Steuerung und Nebenaggregate. Eine reine Bewertung des Kälteerzeugers greift deshalb zu kurz.

Hinzu kommen **Wartungskosten** für Inspektionen, Funktionsprüfungen, Verschleißteile, Reinigung von Wärmeübertragern und sicherheitstechnische Prüfungen. Diese Kosten unterscheiden sich je nach Systemkomplexität, Kältemittel, Aufstellbedingungen und Betreiberanforderungen.

Kältemittelverluste wirken doppelt: Sie verursachen Materialkosten und können durch sinkende Füllmengen den Anlagenbetrieb verschlechtern. Bei regulierten Kältemitteln kommt zusätzlich ein wirtschaftliches Risiko durch steigende Preise oder eingeschränkte Verfügbarkeit hinzu.

Zur **Instandhaltung** gehören Reparaturen, Austausch einzelner Komponenten, Dichtheitsmaßnahmen und Störungsbeseitigung. Bei älteren Anlagen steigen diese Kosten oft nicht linear, sondern sprunghaft an.

Ersatzinvestitionen sind in langfristigen Betrachtungen zwingend zu berücksichtigen. Pumpen, Ventilatoren, Regler oder Verdichter können innerhalb des Gesamtbetrachtungszeitraums erneuert werden müssen.

Die **Preisentwicklung von Energie** beeinflusst die Bewertung erheblich. Eine Anlage mit hohem Strombedarf wirkt unter steigenden Energiepreisen deutlich wirtschaftlich ungünstiger als eine effizientere Alternative mit höherer Anfangsinvestition.

Bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung ist zwischen **statischen** und **dynamischen** Verfahren zu unterscheiden. Statische Verfahren arbeiten mit vereinfachten Durchschnittswerten und betrachten meist nur jährliche Kosten oder Amortisationszeiten. Dynamische Verfahren berücksichtigen dagegen Zeitwert, Preisentwicklungen, Diskontierung und unterschiedliche Zahlungszeitpunkte. Für technisch anspruchsvolle Kälteanlagen sind dynamische Betrachtungen in der Regel aussagekräftiger.

6. Lebenszyklusbetrachtung (LCC)

Die Lebenszyklusbetrachtung bewertet nicht nur die Beschaffung, sondern die gesamte wirtschaftliche Wirkung einer Anlage über einen definierten Zeitraum.

Einbezogen werden **Investitionskosten, Betriebskosten, Wartungskosten, Instandhaltung, Ersatzinvestitionen** und gegebenenfalls ein **Restwert** am Ende des Betrachtungszeitraums. Dieser Zeitraum muss zur erwarteten Nutzungsdauer und zur Entscheidungssituation passen. Zu kurze Zeiträume benachteiligen oft effiziente, aber investitionsintensivere Systeme.

Durch die **Diskontierung** werden künftige Zahlungen auf einen Vergleichszeitpunkt abgezinst. Damit wird berücksichtigt, dass spätere Kosten wirtschaftlich anders zu bewerten sind als sofortige Ausgaben. Erst diese Betrachtungsweise ermöglicht eine belastbare Gegenüberstellung unterschiedlicher Systemvarianten.

Lebenszykluskosten sind entscheidend, weil sie den planerisch relevanten Zielkonflikt zwischen Anfangsinvestition und Dauerbetrieb sichtbar machen. Bei Kälteanlagen ist die energetische Qualität häufig wirtschaftlich bedeutender als geringe Investitionskosten. Wer nur auf die Erstkosten abstellt, blendet den wesentlichen Teil der späteren Kostenwirkung aus.

7. Neubau vs. Bestand

Im **Neubau** bestehen die besten Möglichkeiten zur Optimierung, weil Gebäudehülle, Lasten, Lüftung, Systemtemperaturen und Anlagentechnik gemeinsam entwickelt werden können. Hier lassen sich Effizienzpotenziale früh erschließen, etwa durch reduzierte Kühllasten, angepasste Temperaturkonzepte und bessere Integration von Freikühlung.

Im **Bestand** liegt der Schwerpunkt auf Effizienzsteigerung unter vorhandenen Randbedingungen. Dazu gehören Modernisierung von Regelung und Pumpentechnik, hydraulische Optimierung, Verbesserung der Wärmeübertrager, Anpassung der Systemtemperaturen oder Erneuerung einzelner Komponenten.

Retrofit-Optionen können sinnvoll sein, wenn der Kälteerzeuger oder das Kältemittel angepasst wird, ohne das Gesamtsystem vollständig zu ersetzen. Voraussetzung ist jedoch, dass Restlebensdauer, Lastprofil und technische Eignung dies rechtfertigen.

Grenzen wirtschaftlicher Optimierung bestehen dort, wo bauliche Einschränkungen, unzureichende Lastdaten oder unverhältnismäßig hohe Umbaukosten vorliegen. Im Bestand ist deshalb eine präzise planerische Bewertung erforderlich; pauschale Effizienzversprechen sind technisch nicht belastbar.

8. Typische Fehler bei der Bewertung

Ein häufiger Fehler ist die **Fokussierung nur auf Investitionskosten**. Dadurch werden energetische und betriebliche Unterschiede systematisch unterschätzt. Die Folge sind scheinbar günstige, über die Nutzungsdauer aber teure Anlagen.

Ebenso problematisch ist die **Vernachlässigung des Teillastbetriebs**. Wer nur Nennwerte vergleicht, bewertet nicht den realen Betrieb. Dies führt besonders bei Büro-, Verwaltungs- und gemischt genutzten Gebäuden zu Fehlentscheidungen.

Eine **unzureichende Lastanalyse** führt zu Über- oder Unterdimensionierung. Beide Fälle wirken sich technisch und wirtschaftlich negativ aus. Überdimensionierung verschlechtert die Effizienz, Unterdimensionierung kann Komfort- und Verfügbarkeitsprobleme verursachen.

Auch die **fehlende Berücksichtigung der Energiepreisentwicklung** verfälscht Wirtschaftlichkeitsrechnungen. Anlagen mit hohem Strombedarf werden langfristig unterschätzt.

Häufig wird zudem der **Wartungsaufwand unterschätzt**. Komplexere Systeme können energetisch vorteilhaft sein, aber nur dann, wenn Wartung, Überwachung und Betriebsführung mitgedacht werden. Fehlt diese Betrachtung, wird die Wirtschaftlichkeit unvollständig bewertet.

9. Typische Praxisfragen

Was ist der Unterschied zwischen COP und SEER?

Der COP beschreibt die Effizienz an einem einzelnen Betriebspunkt unter definierten Bedingungen. Der SEER bewertet die saisonale Effizienz über mehrere Lastpunkte und ist daher näher am realen Jahresbetrieb. Für die Wirtschaftlichkeitsbewertung ist der SEER meist aussagekräftiger.

Warum ist Teillastverhalten entscheidend?

Kälteanlagen arbeiten im Gebäudealltag überwiegend nicht unter Volllast. Ein gutes Teillastverhalten reduziert Stromverbrauch, Taktbetrieb und Verschleiß. Deshalb bestimmt der Teillastbereich die Jahreswirtschaftlichkeit stärker als der Volllastpunkt.

Wann ist Freikühlung wirtschaftlich sinnvoll?

Freikühlung ist wirtschaftlich sinnvoll, wenn Standortklima, Nutzungszeiten und erforderliche Systemtemperaturen ausreichend viele Betriebsstunden ohne mechanische Kälte ermöglichen. Besonders vorteilhaft ist sie bei ganzjährigem oder lang andauerndem Kühlbedarf und höheren Kaltwassertemperaturen.

Wie beeinflussen Systemtemperaturen die Effizienz?

Höhere Kaltwassertemperaturen verringern in der Regel die thermodynamische Hubarbeit und verbessern die Effizienz der Kälteerzeugung. Gleichzeitig können sie die Nutzbarkeit von Freikühlung erhöhen. Niedrige Temperaturen steigern dagegen den Energiebedarf.

Wie wird eine Lebenszyklusberechnung durchgeführt?

Zunächst werden Investitions-, Betriebs-, Wartungs- und Ersatzkosten über einen festgelegten Zeitraum ermittelt. Anschließend werden künftige Zahlungsströme diskontiert und gegebenenfalls Restwerte berücksichtigt. Erst dann lassen sich Varianten wirtschaftlich vergleichen.

Welche Haftungsrisiken bestehen bei Fehlbewertung?

Haftungsrisiken entstehen insbesondere dann, wenn Lasten unzureichend ermittelt, Kennwerte falsch interpretiert oder wesentliche Kostenbestandteile nicht berücksichtigt werden. Unzutreffende Wirtschaftlichkeitsprognosen können zu Fehlentscheidungen des Auftraggebers und zu späteren Streitigkeiten über Planungsgrundlagen führen.

10. Schnittstellen in der integralen Planung

Die Bewertung von Kälteanlagen ist eng mit der **Kühllastberechnung** verknüpft. Ohne belastbare Lastdaten ist weder die technische Auslegung noch eine wirtschaftliche Bewertung möglich.

Die **Gebäudehülle** beeinflusst solare Gewinne, Transmissionswärmen und damit den Kühlbedarf direkt. Sommerlicher Wärmeschutz und Kälteanlagenbewertung sind daher technisch nicht voneinander zu trennen.

Die **Abstimmung mit der Lüftungsplanung (KG 430)** ist erforderlich, weil Luftmengen, Kühlregister, Entfeuchtung und Ventilatorleistungen die Anlagenbewertung wesentlich beeinflussen. Eine Kälteanlage kann nicht unabhängig von der Luftseite bewertet werden.

Die **Integration in die Gebäudeautomation (KG 480)** entscheidet mit über Betriebsweise, Lastmanagement, Temperaturführung und Störungsüberwachung. Ohne angepasste Regelstrategie werden Effizienzpotenziale häufig nicht erreicht.

Auch die **F-Gase-Regulierung** hat Einfluss auf die Bewertung, weil Kältemittelwahl, Leckageanforderungen, Dokumentation und langfristige Verfügbarkeit wirtschaftliche Risiken verändern können.

11. Technisches Fazit

Die Bewertung von Energieeffizienz und Betriebskosten von Kälteanlagen erfordert eine systemische Betrachtung. Maßgeblich sind nicht einzelne Nennwerte, sondern das Zusammenwirken von Kühllast, Teillastverhalten, Systemtemperaturen, Hilfsenergien, Regelung und Wartungsaufwand.

Eine realistische Effizienzbewertung orientiert sich am Jahresbetrieb und nicht am Prüfstandspunkt. Deshalb sind saisonale Kennwerte, Lastprofile und Betriebsstrategien für die Planung aussagekräftiger als isolierte Nennzahlen.

Die Lebenszyklusbetrachtung ist wirtschaftlich entscheidend, weil bei Kälteanlagen die laufenden Kosten häufig stärker ins Gewicht fallen als die Anfangsinvestition. Technisch belastbare Entscheidungen entstehen daher nur aus der Verbindung von Auslegung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit.

Integrale Planung ist hierfür Voraussetzung. Nur wenn Gebäudehülle, Kühllast, Lüftung, Kälteerzeugung, Hydraulik und Automation gemeinsam betrachtet werden, lässt sich die tatsächliche Effizienz einer Kälteanlage sachgerecht bewerten.

12. Abschlusshinweis

Als TGA-Ingenieurbüro mit Sitz in Köln begleitet MT Ingenieure Projekte von der Grundlagenermittlung bis zur Ausführungsplanung über alle Gewerke hinweg.