

# CIRCULAR THERMAL<sup>SM</sup>

WIE SICH ABWÄRME IN INDUSTRIELLE PROZESSE  
UND ANDERE BEREICHE ZURÜCKFÜHREN LÄSST



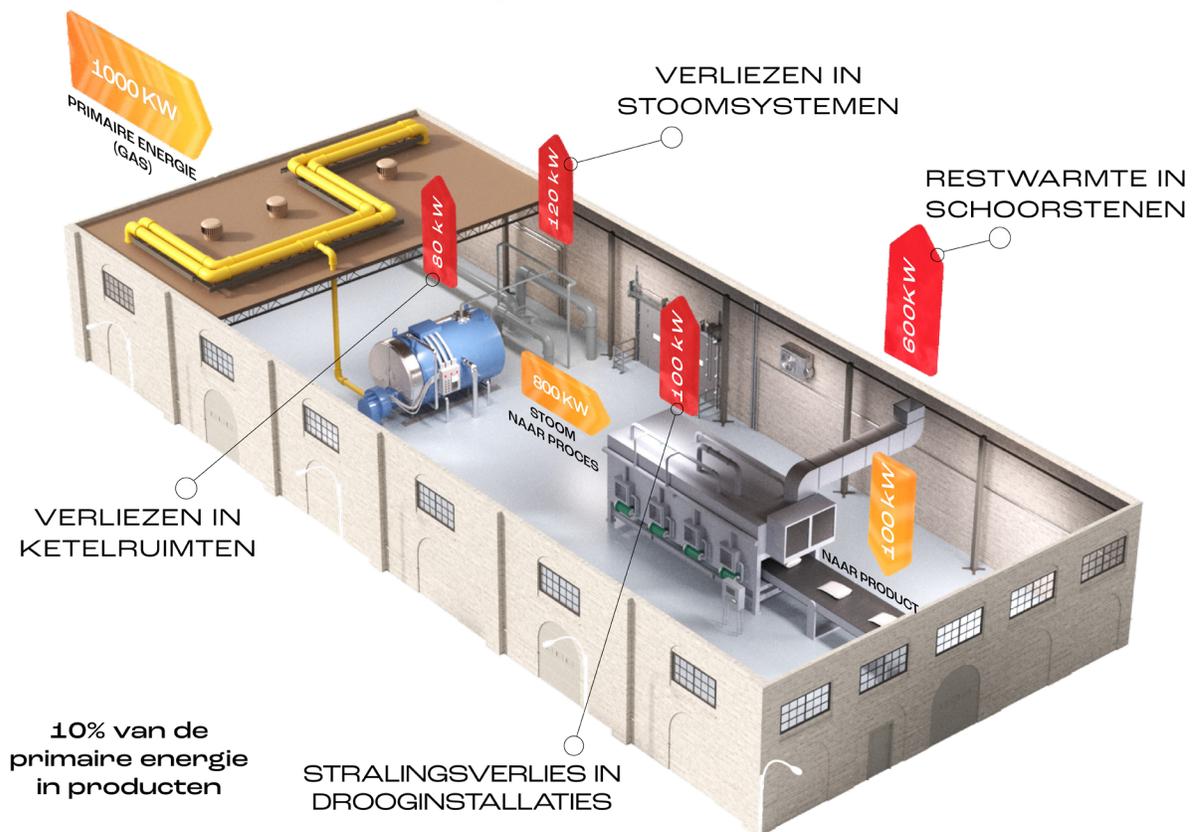
**Armstrong<sup>®</sup>**  
EXPERIENCE MATTERS<sup>™</sup>

## WOHIN GEHT DIE ENERGIE?

Einfach ausgedrückt, besagt der erste Hauptsatz der Thermodynamik, dass Energie weder zerstört noch erzeugt werden kann: Ihre Menge innerhalb eines Systems bleibt stabil. Wenn Energie in Arbeit umgesetzt wird, manchmal durch Umwandlung von einer Form in eine andere, wird sie zu einer niedrigeren Energiequalität herabgestuft. Wenn also die Energie in einer Industrieanlage abgebaut, aber nicht zerstört wird, wie verlässt sie dann die Anlage?

In ein Kraftwerk wird Primärenergie derzeit in Form von Elektrizität und fossilen Brennstoffen eingebracht, wobei jedoch der Anteil an erneuerbaren Energien zunimmt. Der Umfang dieser Quellen ist messbar, daher ist die Menge der eingehenden Primärenergie bekannt. In einem typischen Betriebsgebäude werden weniger als 20 % der eingehenden Energie zur Bewegung von Gegenständen (Motoren, die Strom in mechanische Energie umwandeln) oder zur Beleuchtung der Gebäude genutzt. Aus Gründen der Energieeffizienz wird ein Teil dieser Energie schließlich zu Abwärme, die die Lufttemperatur im Inneren des Gebäudes erhöht. Fließen also die restlichen 80 % der für die Wärmeversorgung genutzten Primärenergie in die hergestellten Produkte? In den meisten Branchen wird nur ein kleiner Teil der Primärenergie in chemische Energie umgewandelt, die im Endprodukt enthalten ist. Zudem haben die bei der Herstellung verwendeten Ausgangsmaterialien in der Regel die gleiche Temperatur (oft die Umgebungstemperatur) wie die Produkte, die das Werk verlassen. Tatsächlich liegt der Großteil der Primärenergie am Ende als Abwärme vor, die in vielen Fällen nach wie vor über Schornsteine, Kühltürme und Kanalisation verloren geht.

### Standard-Einbahn-Thermalsystem – Einzelner Prozessanwender



## HEIZEN UND KÜHLEN IN DER INDUSTRIE

Die Abfolge von Heiz- und Kühlvorgängen ist die Grundlage industrieller Prozesse. Anlagen sind darauf ausgelegt, den Produktfluss zu erleichtern, während sich Heizen und Kühlen in den verschiedenen Prozessstufen aus energetischer Sicht oftmals nur ausgleichen.

### KÜHLEN

Kühlung erfolgt durch Wärmeentzug aus einer Flüssigkeit. Die entzogene Wärmeenergie wird in der Regel durch Kühltürme abgeleitet, die Wärme und Wasserdampf an die Atmosphäre abgeben. Die als Teil des Kühlprozesses entzogene Energiemenge kann bis zu einem Drittel des Wärmebedarfs einer Anlage ausmachen – bisweilen sogar noch mehr.

Ein Luftkompressor ist ein gutes Beispiel: Bis zu 90 % des Stromverbrauchs eines Luftkompressors werden durch die Kühlung des Kompressors zu Abwärme. Je nach Luftfeuchtigkeit entsteht durch die Kondensation weitere Abwärme, die 5 bis 20 % der elektrischen Leistung des Kompressors ausmacht. Die Summe dieser beiden Faktoren kann manchmal mehr als 100 % des Stromverbrauchs des Kompressors ausmachen.

Das größte Potenzial bei Abwärme aus Kühlvorgängen gibt es in Betrieben, die Tiefkühlverfahren für Speiseeis, Tiefkühlkost und andere Produkte einsetzen, die beim Verlassen der Anlage kälter sind als die Rohstoffe bei ihrem Eintritt. Durch Wärmeentzug aus den Produkten erzeugen sie einen erheblichen Überschuss an Abwärme aus der Kühlung. Mit dieser Energie können die Betriebe nicht nur ihren eigenen Wärmebedarf decken, sondern auch einen Teil des Wärmebedarfs ihrer Nachbarn.

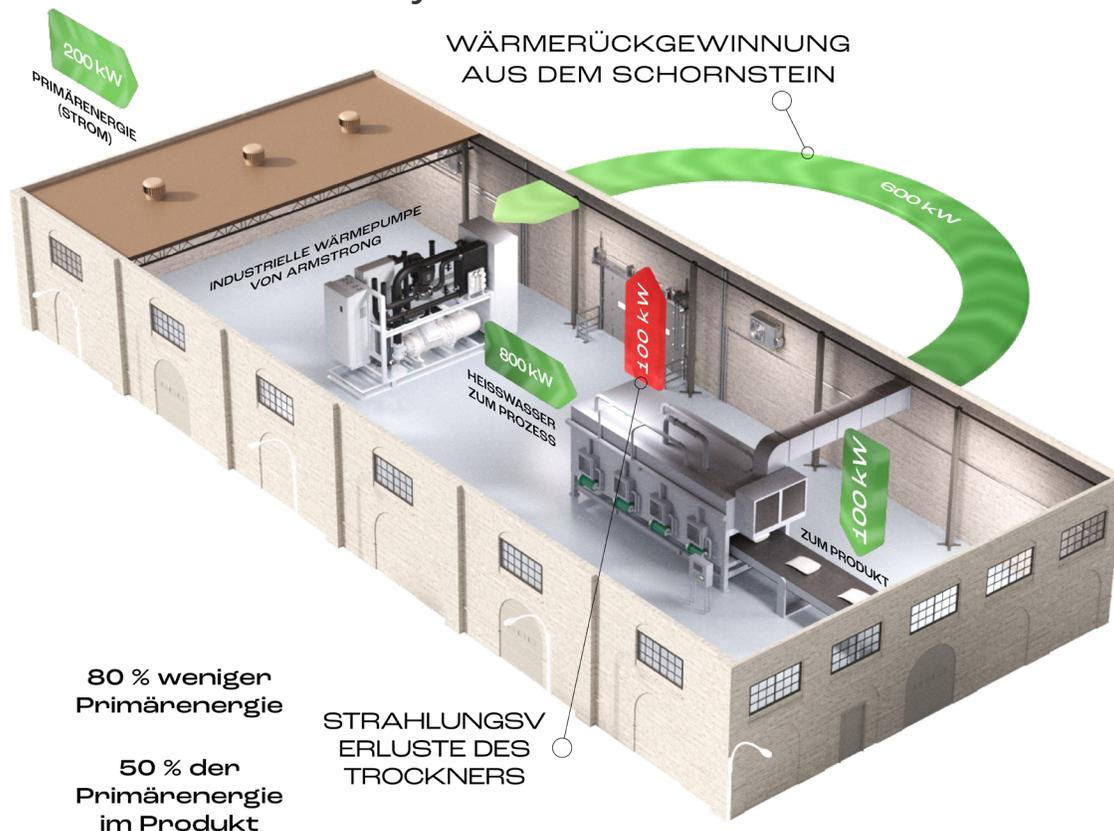
## HEIZEN

Beim Heizen geht Energie durch Ineffizienzen bei der Erzeugung und Verteilung an die Atmosphäre verloren. Der Wirkungsgrad einer typischen Dampfanlage liegt in der Regel zwischen maximal 60 % und 80 %. Die verbleibende Energie wird für wichtige Aufgaben genutzt, z. B. zum Trocknen von Produkten durch Wasserverdampfung, zum Erhitzen von Produkten, um dadurch eine chemische Reaktion auszulösen, zum Erhitzen/Befeuchten/Entfeuchten von Luft, zum Erhitzen von Wasser zu Reinigungszwecken und vielem mehr. Aber was passiert danach mit der Energie? In einem Trockner, einer der größten Heizanwendungen in der Industrie, werden bis zu 80 % der Energie in Form von sehr feuchter Luft mit niedriger Temperatur (<80°C) über Schornsteine an die Atmosphäre abgegeben. Dies gilt auch für die meisten anderen industriellen Anwendungen, und in bestimmten Fällen, z. B. bei Destillierkolonnen und Verdampfern, muss das Ausgangsprodukt oftmals gekühlt werden.

## EIN KREISLAUFKONZEPT ALS NEUER ANSATZ

Die Qualität der in Abwärme enthaltenen Energie hat sich zwar verringert, aber die darin enthaltene Menge an Energie ist immer noch sehr groß. Unseren Studien zufolge verlassen 50 % bis 80 % der in der Leichtindustrie genutzten Primärenergie die Anlage als Abwärme bei mittleren Temperaturen (200°C) oder sogar bei niedrigen Temperaturen (<90°C). Das bedeutet, dass sich 50 bis 80 % dieser Energie wiederverwenden lassen und dementsprechend die damit zusammenhängenden Scope-1-Emissionen vermieden werden könnten. Mit einem Kreislaufkonzept für industrielle Wärme lässt sich diese Energie zurückgewinnen und wieder in den Prozess einbringen.

### Circular Thermal<sup>SM</sup> System – Einzelprozessanwender



Seit mehr als 40 Jahren nutzt die Schwerindustrie die Prozessintegration (PI) oder Pinch, um die thermische Effizienz von Anlagen zu maximieren, hauptsächlich durch direkte Wärmerückgewinnung. Diese Methode besteht darin, kalte und heiße Ströme in einer Anlage abzubilden und zu überlagern und so die maximale theoretische Wärmerückgewinnung und den geringstmöglichen Energiebedarf der Anlage zu berechnen. Das Ergebnis ist ein idealer Entwurf, der mithilfe ausgeklügelter gegenseitiger Abstimmung an die praktischen Gegebenheiten des Standorts angepasst werden kann. In der Leichtindustrie ist ein zusätzliches „Wärmetauschnetz“ erforderlich, um geringwertige Wärme aus den Quellen zurückzugewinnen, zu speichern, ggf. qualitativ hochzustufen und sie den Wärmeableitern zukommen zu lassen. Mit dieser Methode ist es möglich, die Abwärme industrieller Anlagen zurückzugewinnen sowie ihren Primärenergieverbrauch und ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen erheblich zu verringern. Wir nennen diesen Vorgang Circular Thermal<sup>SM</sup>.

## CIRCULAR THERMAL<sup>SM</sup> IST DAS KERNSTÜCK DES DEKARBONISIERUNGSVERFAHRENS VON ARMSTRONG

Das Verfahren von Armstrong zur thermischen Dekarbonisierung umfasst drei Schritte: Optimierung der thermischen Systemeffizienz, Minimierung des Energiebedarfs in den Prozessen und Dekarbonisierung der primären Energiequellen der Anlage. Als Teil der Systemoptimierung hat Circular Thermal<sup>SM</sup> oftmals erhebliche Auswirkungen mit positivem Einfluss auf den Return on Investment (ROI).

### **Schritt 1: Optimierung der Effizienz thermischer Systeme durch Abwärme-Rückgewinnung**

Obwohl die theoretische Grundlage von Circular Thermal<sup>SM</sup> seit langem bekannt ist, wurde sie beim Neubau von Industrieanlagen aus wirtschaftlichen Gründen häufig ignoriert. Früher galten fossile Brennstoffe als billig und reichlich vorhanden, und nur wenige machten sich Gedanken über CO<sub>2</sub>-Emissionen. Somit war es einfach und bequem, thermische Einwegsysteme zu entwerfen und zu betreiben. Das ist heute jedoch nicht mehr der Fall. In der heutigen Welt ist Energie ein geopolitisches und wirtschaftliches Risiko, fossile Brennstoffe werden zunehmend teurer und sind manchmal nicht verfügbar, Strom aus erneuerbaren Energien wird günstiger, CO<sub>2</sub>-Emissionen haben ihren Preis – und die Amortisation von Circular Thermal<sup>SM</sup> verbessert sich erheblich. Sobald fossile Brennstoffe aus dem Spiel sind, wird aus der Rückgewinnung von Abwärme der wirtschaftlich sinnvollste Weg zur Dekarbonisierung thermischer Systeme.

#### **Entschwadung**

Dampfsysteme erzeugen und verteilen in der Regel Wärme bei 185°C (das entspricht 10 bar(ü) Sattdampf), selbst wenn der Prozess eine viel niedrigere Heiztemperatur erfordert. Die Rückgewinnung von Abwärme zur Erzeugung von Niederdruckdampf, der dann auf einen höheren Druck verdichtet werden kann, ist technisch machbar. Wenn das endgültige Ziel jedoch darin besteht, ein Produkt bei einer viel niedrigeren Temperatur zu erwärmen, führt dies zu einem übermäßigen Energieverbrauch, der zum Teil auf die mindestens 20-prozentigen Verluste zurückzuführen ist, die bei Dampfsystemen auftreten.

Deshalb halten wir Heißwasser für das beste Heizmedium bis 120°C. Bei der Entschwadung geht es darum, Dampfsysteme durch Heißwasser- oder Glykolsysteme zu ersetzen, um die Abwärmenutzung zu optimieren. Durch größere Annäherung von Wärmeerzeugung und Wärmenutzung im Rahmen des Prozesses optimiert Entschwadung die Systemeffizienz. Armstrong International verfügt über mehr als ein Jahrhundert Erfahrung mit Dampfsystemen, und wir empfehlen die Entschwadung für geringwertige Erwärmung.

Theoretisch erfordert Warmwasser größere Wärmeaustauschflächen, da die fühlbare Wärme 4 bis 5 Mal weniger Energie enthält als latente Wärme. In der Praxis sind vorhandene Dampfwärmetauscher jedoch häufig überdimensioniert, daher reicht es oftmals aus, die Wärmeaustauschfläche zu verdoppeln. Entschwadung beseitigt auch die Probleme mit der Kondensatableitung, wie sie bei Anwendungen auftreten, die mit Dampf unter 100°C beheizt werden; dadurch kann in Wärmetauschern ein Vakuum entstehen.

Schließlich sollten Wärmequellen mit nahegelegenen Wärmeableitern verbunden sein, damit größere Wasserleitungen nicht übermäßig lang sein müssen. Dieses dezentrale Systemdesign ist ein fester Bestandteil von Circular Thermal<sup>SM</sup>-Systemen, im Gegensatz zum herkömmlichen Ansatz eines zentralen Dampfkesselraums und Verteilungsnetzes.

## Wärmepumpen

Hochwertige Abwärme lässt sich oftmals mit nur einem Wärmetauscher zurückgewinnen, obwohl dies aufgrund der Verunreinigung der durch Schornsteine abgeleiteten Prozessluft manchmal eine technische Herausforderung darstellt. Allerdings ist die Abwärme oft mit niedrigeren Temperaturen verfügbar, als es der Prozess erfordert, sodass die Wärme niedriger Qualität zu Wärme mittlerer Qualität aufgewertet werden muss. Das erfordert zusätzlich hochwertige Energie (Strom) für den Betrieb der Wärmepumpenkompressoren, die Abwärmepumpen auf das erforderliche Niveau anheben.

Die bei Wärmepumpen eingesetzte Technologie gibt es seit 170 Jahren. Es ist die gleiche Technologie, mit der unser Kühlschränke zu Hause und die Klimaanlage im Büro betrieben werden. Effizienz ist der wichtigste Vorteil von Wärmepumpen. Der für den Betrieb einer Wärmepumpe benötigte Strom macht in der Regel nur ein Viertel bis ein Drittel der gesamten Wärmeleistung aus, und nahezu der gesamte Strom wird letztlich in Nutzwärme umgewandelt. Der größte Teil der erzeugten Energie stammt jedoch aus der zurückgewonnenen, geringwertigen Abwärme. Wärmepumpen werden oft als Technologie zur thermischen Elektrifizierung betrachtet, aber in industriellen Anwendungen sind sie in erster Linie eine Technologie zur Aufwertung von Abwärme.

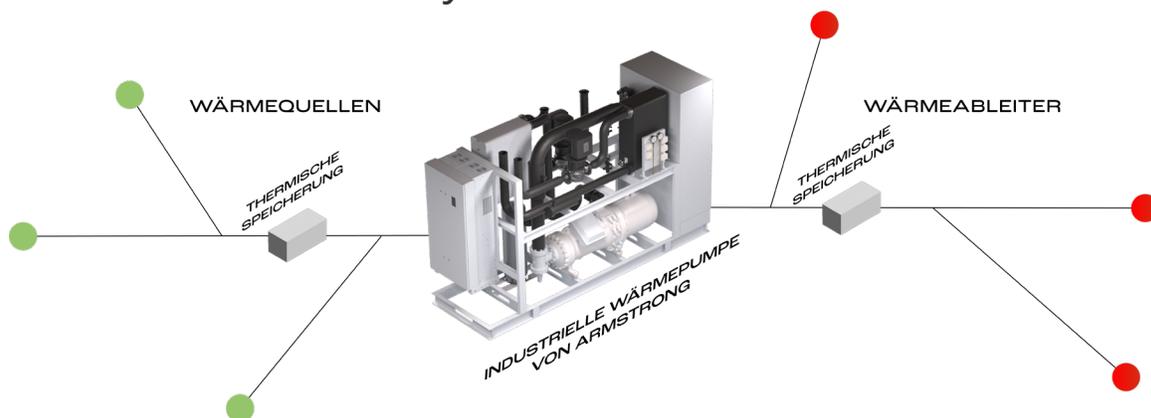
Wärmepumpen mit geschlossenem Kreislauf sind nunmehr für mittlere Leistungen erhältlich (zwischen 0,5 MW bis 2 MW pro Stunde und Einheit). Diese Wärmepumpen nutzen Betriebsflüssigkeiten einer neuen Generation, die für die Nutzer sicherer und zuverlässiger sind (aufgrund des relativ geringen Drucks im Kreislauf) und die Umwelt nur begrenzt belasten (GWP <10 und TFA-Abbau <2 %). Sie können für Temperaturen im mittleren Bereich sorgen, d. h. geringwertige Abwärme <80°C zurückgewinnen (und als Nebeneffekt manchmal nutzbare Kühlung erzeugen) und diese Wärme auf 120°C erhöhen, womit sich bei Bedarf Niederdruckdampf erzeugen lässt.

Dieser Dampf steht zur Direkteinspritzung bereit, oder sein Druck und seine Temperatur können mit einem Dampfkompressor als Teil eines Systems zur mechanischen Dampfkompression (MVR) erhöht werden. Diese Kompressoren benötigen etwa 10 % Wassereinspritzung. Der zusätzliche Dampf gleicht Strahlungsverluste und Leckagen im nachgelagerten Dampfsystem aus. Durch die Rückgewinnung von Kondensat und Entspannungsdampf über Wärmetauscher hinaus und deren Rückführung in die Hochtemperatur-Wärmepumpe kann der Kreislauf geschlossen und ausgeglichen werden.

## Speicherung

Abwärme ist nicht immer dann und dort verfügbar, wann und wo sie gebraucht wird. Nach der Rückgewinnung muss sie umgelagert und gespeichert werden (zumeist in Form von heißem Wasser oder durch Nutzung fester Materialien), bis sie im Prozess genutzt werden kann. Obwohl der benötigte Platz bei bestimmten Anlagenkonfigurationen ein Problem darstellen kann, gibt es zuverlässige Technologien zur Lösung dieses Problems.

### Circular Thermal<sup>SM</sup> System – Mehrere Prozessanwender



Mit Circular Thermal<sup>SM</sup> entsteht ein thermisches System mit höherer Dynamik, da die Wärme in mehreren Richtungen durch die Anlagen fließt. Die zurückgewonnene Wärme wird gespeichert und dann von niedrigeren auf höhere Temperaturen hochgestuft, wenn es am zweckmäßigsten ist oder wenn der Netzstrom am billigsten ist, und erleichtert auf diese Weise die Nachfragesteuerung. Systeme dieser Art sind in höherem Maße automatisiert und entscheiden anhand von Echtzeitdaten, wann Wärme umgelagert oder gespeichert werden soll. Zudem sind sie als Serviceleistung verfügbar, wodurch sie den Kapitalbedarf senken, die Auslagerung von Risiken ermöglichen und bei der Anlagennutzung die Flexibilität bieten, die zur Anpassung an eine sich ständig verändernde Welt erforderlich ist.

## Schritt 2: Minimierung des Energiebedarfs in den Prozessen

Das Verhältnis zwischen Stromzufuhr und Nutzwärmeleistung einer Wärmepumpe wird als Leistungszahl (Coefficient of Performance, COP) bezeichnet und hängt von der Temperaturerhöhung ab. Die Optimierung der COP ist die Hauptmotivation dafür, die Temperaturen von Wärmequellen und Wärmeableitern so genau wie möglich aufeinander abzustimmen. Wenn eine Wärmepumpe Nutzarbeit verrichtet, indem sie sowohl die Quelle kühlt als auch den Ableiter erwärmt (z. B. bei einem Destillationsprozess), ohne dabei mehr Strom zu verbrauchen, weist sie eine wesentlich höhere kombinierte Leistungszahl (CCOP) auf.

Die Auslegung vieler Prozesse beruhte bislang auf höheren Versorgungstemperaturen, die mit Dampf relativ leicht zu erreichen sind. Eine Analyse der tatsächlichen Dampftemperatur im Wärmetauscher (nach der Drucksenkung durch ein Regelventil) oder die Ermittlung der genauen Temperaturanforderungen des Prozesses ergibt jedoch häufig, dass die erforderliche Temperatur der Wärmeableiter viel niedriger ist als erwartet. Folglich erhöht sich der COP, ohne die Prozessbedingungen oder die Produktqualität zu beeinträchtigen.

Wärmepumpen, die niedrigere Ausgangstemperaturen erzeugen, benötigen weniger Strom und haben dementsprechend eine höhere Leistungszahl. Die sich daraus ergebende dauerhafte Senkung der Betriebskosten ist den Aufwand wert, selbst in Fällen, in denen zusätzliche Investitionsausgaben erforderlich sind (hauptsächlich für die Entschwadung). Langfristig lassen sich die Betriebskosten noch weiter senken, indem veraltete oder am Ende ihrer Nutzungsdauer angelangte Prozessausrüstung durch moderne Anlagen mit höherer Energieeffizienz oder niedrigeren Heiztemperaturen ersetzt wird.

In bestimmten Fällen kann die gleiche Nutzarbeit auch ganz ohne Wärmezufuhr erbracht werden. So wurde beispielsweise Dampf zur Luftbefeuchtung im Gesundheitswesen oder in der Pharmaindustrie eingesetzt, wobei die gleiche Erhöhung der Luftfeuchtigkeit mit adiabatischen oder elektrischen Luftbefeuchtern erreicht werden kann. Diese Befeuchter verbrauchen zwar nicht weniger Energie zur Verdampfung von Wasser bei Atmosphärendruck, aber sie ermöglichen die Entschwadung von Luftaufbereitungsanlagen (AHUs). Dadurch entfallen die Erzeugung von Dampf mittlerer Temperatur mit Wärmepumpen und die daraus resultierende geringere Leistungszahl ebenso wie die anschließende Verteilung mit den damit verbundenen Verlusten im Dampfsystem.

## Schritt 3: Dekarbonisierung Ihrer primären Energiequellen

Die für den Betrieb von Circular Thermal<sup>SM</sup> benötigte Primärenergie wird in Form von Strom zugeführt, der durch den Einsatz erneuerbarer Energien dekarbonisiert werden kann. Der Rest der thermischen Dekarbonisierung kann durch die Umstellung auf erneuerbare Energien wie Biogas, Biomasse, Solarthermie, Wasserstoff oder direkte Elektrifizierung erreicht werden. Dies ist die letzte Phase des dreistufigen Verfahrens von Armstrong zur thermischen Dekarbonisierung.

Entscheidend ist jedoch, die Dekarbonisierung erst dann umzusetzen, wenn das Potenzial zur Optimierung und Minimierung ausgeschöpft ist. Die Umstellung von Einbahn-Wärmesystemen, bei denen 50 bis 80 % der Primärenergie als Abwärme in die Atmosphäre gelangen, auf erneuerbare Energien ist ein Fehler. Dies führt zu einer erheblichen Verschwendung knapper erneuerbarer Energie, die zur Dekarbonisierung schwer herabzustufender Anwendungen in der Schwerindustrie, im Verkehrswesen oder im Gebäudesektor unerlässlich ist.

## DIE VORTEILE VON CIRCULAR THERMAL<sup>SM</sup> SIND BETRÄCHTLICH

Ein sehr großer Prozentsatz der derzeit in der Industrie verwendeten Wärmeenergie kann mithilfe von Circular Thermal<sup>SM</sup> zurückgewonnen werden. Zudem sollte diese Methodik nicht auf einen einzigen Betrieb beschränkt bleiben. Während in immer mehr Branchen ein Kreislaufansatz bei der Material- und Energieerzeugung verfolgt wird, findet die gemeinsame Nutzung und Aufwertung von Abwärme zwischen benachbarten Industrieanlagen, Wasserstoff-Elektrolyse-Anlagen, Rechenzentren, Bürogebäuden und Städten noch zu selten statt. Die Entwicklung transportfähiger Wärmespeicher aus festen Materialien erweitert die Möglichkeiten des physischen Transports von Abwärme über mittlere Entfernungen (idealerweise mit dekarbonisierten Transportmitteln). Schwerindustriebetriebe mit einem Überschuss an hochwertiger Abwärme können diese mit Leichtindustriebetrieben oder einer mehrere Kilometer entfernten Fernwärmanlage teilen.

## Das Heiz- und Kühlpotenzial in Gebäuden

Rückgewinnung und Wiederverwendung von Abwärme kann auch zum Heizen und Kühlen von Gebäuden ins Auge gefasst werden. Allerdings stellt die Anwendung von Circular Thermal<sup>SM</sup> in Gebäuden eine größere Herausforderung dar als in der Industrie, und zwar aufgrund eines wesentlichen Unterschieds: der zeitlichen Planung. Industrielle Anwendungen erfordern regelmäßiges Heizen und Kühlen, zumindest wöchentlich, wodurch die Anforderungen an die Größe der Wärmespeicher geringer sind. Circular Thermal<sup>SM</sup> für die Gebäudeheizung und -kühlung würde eine saisonale Wärmespeicherung erfordern, die Wärme bis zu sechs Monate lang auf annähernd gleicher Temperatur hält. Wenn eines Tages erschwingliche, saisonale Wärmespeicher in kleinen Mengen kommerziell verfügbar sind, werden sie die durchschnittliche jährliche Leistungszahl von Wärmepumpen, die zum Heizen und Kühlen von Gebäuden eingesetzt werden, beträchtlich erhöhen und damit den jährlichen Primärstromverbrauch erheblich verringern.

Gebäudekühlung ist bereits jetzt als Wärmequelle für nahe gelegene Industrien nutzbar, die ganzjährig Wärme benötigen. Solche „Fernkältesysteme“ könnten vor allem in wärmeren Klimazonen sinnvoll sein, wo die meiste Zeit des Jahres gekühlt werden muss. In kälteren Klimazonen könnte das Abwassersystem eine wertvollere Wärmequelle von Gebäuden sein, wobei einmalig erwärmtes Sanitärwasser aus Duschen und Wasserhähnen gesammelt wird.

Eine weitere Quelle für Wärmepumpen in Gebäuden ist Erdwärme, entweder aus der Tiefe oder aus Seen und Flüssen. Gegenüber der Umgebungsluft bietet Erdwärme eine höhere Temperatur, die das ganze Jahr über relativ stabil bleibt. Im Sommer ist diese Quelle oft kalt genug, um den Kompressor der Wärmepumpe zu umgehen, und so den Betrieb im Modus einer „freien Kühlung“ ermöglicht.

## CIRCULAR THERMAL<sup>SM</sup> MACHT THERMISCHE DEKARBONISIERUNG EINFACHER

Auf Heizung und Kühlung in Industrie und Gebäuden entfallen etwa 70 % des derzeitigen weltweiten Endenergieverbrauchs. Durch Rückgewinnung, Aufwertung und Wiederverwendung der in Industrieanlagen anfallenden Abwärme ist es möglich, die thermische Dekarbonisierung wesentlich zu vereinfachen und die Menge an erneuerbarer Energie, die für den Betrieb dieser Anlagen in Zukunft erforderlich ist, zu verringern. Überall auf der Welt ist die Umstellung bestehender Anlagen bereits im Gange, und immer mehr neue Systeme werden auf Basis von Circular Thermal<sup>SM</sup> konzipiert.

Die Ausweitung dieses Konzepts über die Grenzen eines Einzelbetriebs hinaus bis in andere Gebäuden wird den Bedarf an Primärenergie senken und die Dekarbonisierung der globalen Energiesysteme weiter vorantreiben.



INTELLIGENTE LÖSUNGEN FÜR WÄRMEVERSORGUNGSANLAGEN VON EINEM  
WELTWEIT FÜHRENDEN UNTERNEHMEN FÜR ENERGIEMANAGEMENT UND  
ANGENEHME ERFAHRUNGEN

**Armstrong International**

Nord-/Südamerika | Asien | Europa, Nahost, Afrika

[armstronginternational.com](https://armstronginternational.com)