



## Regellast – Kälteerzeugung

In einem gemeinsamen Projekt der Factor4Solutions und Rubitherms, beide Berliner Innovationstreiber in ihren Sektoren, wird gemeinsam mit einem engagierten mittelständischen Kunden, Christian Dunkel GmbH, in Berlin Adlershof gezeigt, wie sektorübergreifend zukünftige Kälteerzeugung, in diesem Fall zu Produktionszwecken, bei preislich volatilem Stromangebot und Eigenstromerzeugung mit PV Anlage, betrieben werden kann. Ob als Regellast oder einfach um Kosten und mit dem Energiebedarf verbundene CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken – die Zukunft für Kältesystemsteuerung – Made in Berlin.

### Einleitung

#### *Thematische Einführung*

Kälteerzeugung ist aktuell (VDMA, 2022) verantwortlich für ca. 15% des bundesdeutschen Strombedarfs. Weltweit ist der Anteil ähnlich und die am stärksten wachsende Energienutzungsart. Kälteerzeugung dominiert in vielen Marktsektoren die energetischen Betriebskosten (Krankenhäuser, ca. 30%; Supermärkte, bis zu 50%, Rechenzentren, bis zu 40%). Sie gilt in der Regel als kritische Infrastruktur, weil direkt die Produkte (Lebensmittel, Impfstoffe, Rechenleistung, Präzisionsmechanik, etc.) ohne eine quantitativ ausreichend und verfügbare Kälteversorgung verderben bzw. nicht möglich wären. In der Gebäudeklimatisierung ist die Kälteversorgung wegen der gestiegenen internen Lasten und der Arbeitsplatzanforderungen, aber auch im Sinne der Produktivität der Gebäudenutzer nicht mehr wegzudenken.

95% der Kälteversorgung basieren auf der Umwandlung, bzw. Nutzung von Strom zur Erzeugung von Kälte, 100% der Kälteerzeugungstechnologien sind davon abhängig das elektrische Leistung im Moment der Kälteerzeugung zur Verfügung steht.

Die Transformation der Stromerzeugung kennt in der Debatte drei, hinsichtlich ihrer Regelbarkeit gut differenzierbare Erzeugungsarten. Fossile Verbrennungstechnologien (Gas, Kohle, etc.) mit unterschiedlicher, aber häufig guter Regelbarkeit, am besten sind hier Gaskraftwerke, über schwer, hinsichtlich dynamischer Leistung, regelbaren Kernkraftwerken und schwer beeinflussbarer Bereitstellung sehr sauberen Stroms durch erneuerbare Energien durch Sonne und Wind. Müllverwertung und Wasserkraft in Fließgewässern bieten generell eine Regelbarkeit, sind aber im Leistungsangebot stark beschränkt. Pumpspeicherkraftwerke stellen schnell regelbare Speicher dar.

Speicher stellen eine Möglichkeit dar, die Erzeugung und den Verbraucher zu entkoppeln. Das kommt neben der Integration erneuerbarer Energie auch der Nutzung von Kernkraft zugute. Während Pumpspeicherkraftwerke ökologisch in der Kritik stehen und einen hohen Flächenbedarf haben, sind rein elektrische Stromspeicher teuer und altern relativ schnell. Ihre Leistungsdichte nimmt ab. Power to heat ist eine Möglichkeit die Netze zu stabilisieren, verfügt aber nur über eine geringe Gleichzeitigkeit zwischen Wärmeerzeugung und Lastabnahme und speichert in dem Sinne keine Energie, um sie zu nutzen, wenn sie gebraucht wird.

Kältespeicher, die die Energie in Form von Temperaturänderung speichern sind umweltfreundlich, degradieren nicht, sind aber hinsichtlich der volumetrischen Energiedichte sehr eingeschränkt,



weil Kälteanwendung typischerweise nur sehr kleine Temperaturspreizungen erlauben. Eine Lösung können hier sogenannte PCM-Speicher (phase-change-material) darstellen. Der bekannteste PCM-Speicher dürfte Eis sein, das bei 0°C im Phasenwechsel Energie speichern kann, die dem Äquivalent einer Temperaturänderung von flüssigem Wasser von 50 Kelvin entspricht. Aber auch andere Stoffe, die ihre Phase dort verschieben, wo der Anwendungsfall die Energie benötigt (bei Kälte ca. 6-20°C) stehen zur Verfügung und werden stetig besser.

#### *Die Partner*

**Die Factor4Solutions GmbH** ist ein SpinOff der TU Berlin, im Sommer 2023 von drei Hands-On Wissenschaftlern gegründet, die u.a. 2021 von der Internationalen Energieagentur für ihre veröffentlichten Forschungsarbeiten zu Effizienzsteigerung in der Kältetechnik ausgezeichnet wurden. Mit 8 Mitarbeitenden in Berlin verfolgen wir die Vision den Bedarf an Strom für die Kälte- und Wärmeversorgung durch unser Energiemanagementsystem um 40% zu reduzieren. Durch kontinuierliche F&E greifen wir ständig aktuelle Themen auf.

**Rubitherm Technologies GmbH** ist ein in Berlin ansässiges Unternehmen und einer der weltweit führenden Anbieter von Phase-Change-Materialien (PCM). Seit den 1990er-Jahren entwickelt und produziert Rubitherm thermische Speicherlösungen, die Wärme oder Kälte bei konstanten Temperaturen speichern und wieder abgeben. Fokus des Unternehmens ist die Entwicklung effizienter, nachhaltiger Lösungen zur Reduktion von Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die **Christian Dunkel GmbH** (Werkzeugbau) ist ein mittelständisches Unternehmen mit Sitz in Berlin-Adlershof und spezialisiert auf die Entwicklung und Fertigung von Vorrichtungen, Prototypen und Sondermaschinen. Seit über 30 Jahren realisiert das Unternehmen maßgeschneiderte Lösungen für anspruchsvolle Industrien wie Automobil-, Luft- und Raumfahrt sowie Medizintechnik. Das Leistungsspektrum reicht von präzisen Spann- und Messvorrichtungen bis hin zu vollautomatisierten Produktionsanlagen. Dunkel steht für hohe Fertigungstiefe, Präzision und enge Entwicklungspartnerschaften mit Kunden zur Umsetzung komplexer industrieller Anforderungen.

Die drei Berliner Unternehmen eint die Lust in ihren jeweiligen Sektoren eine federführende Rolle einzunehmen und permanent neue Lösungen für die eigenen Kunden zu entwickeln. Die Fa. Dunkel benötigt für ihre Werkzeugmaschinen permanente Kühlung mit sehr hohen Anforderungen an die Kälteversorgung, um die Qualität der eigenen Produkte zu gewährleisten. Die Unternehmensführung strebt zudem eine nachhaltige Energieversorgung der eigenen Standorte an, was sich z.B. an einer vollumfänglichen PV-Dachanlage auf dem eigenen Standort in Berlin Adlershof widerspiegelt.

## Methodik

### Aufgabenstellung

Das zu optimierende System, das hier im Rahmen der Vorstellung betrachtet wird, umfasst eine PV-Solaranlage zur Eigenstromproduktion, eine Kälteerzeugungsanlage mit a. 80 kW installierter Leistung (mehrere Kompressoren, RKW, Pumpen und die Möglichkeit zur freien Kühlung bei niedrigen Umgebungstemperaturen). Dunkel bezieht zusätzlich Strom über einen Stromanschluss der es erlaubt Strom zu volatilen day-ahead Preisen einzukaufen aber auch überschüssigen Strom aus der PV-Produktion einzuspeisen. Die Deckung der Kältelast ist für Dunkel zwingend, da die Produktions- und Fertigungstoleranzen nur eingehalten werden können, wenn die Zerspanungsmaschinen exakt temperiert werden. Die ständige Verfügbarkeit der Kälte ist daher zu jedem Zeitpunkt zu gewährleisten.

### Lösungsansatz

Der Lösungsansatz zur Reduktion der Kosten für die Kältebereitstellung bei gleichzeitiger Senkung der verbundenen CO<sub>2</sub> Emissionen umfasst gleichermaßen die Optimierung der Kälteerzeugungsanlage im Zusammenspiel der Komponenten als auch die verbesserte Nutzung des Stroms aus der PV-Anlage und des Strombezugs, wenn dieser besonders viel erneuerbaren Strom enthält. Als Indikator für einen hohen Anteil an erneuerbarem Strom im Netz wird der Strompreis verwendet. Die Überlagerung von, bzw. Wirkung geringer Abnahme von Strom aus dem Netz, die ja ebenfalls zu niedrigeren Preisen führt hat generell einen geringeren Einfluss auf besonders niedrige Strompreise. Immer wenn der Strompreis deutlich unter den Grenzkosten für fossil oder nuklear erzeugten Strom fällt, kann ein Überschuss von Strom aus erneuerbaren Quellen zugrundegelegt werden. Bei Betrachtung der Strompreise am Spot-Markt der vergangenen Jahre, wie sie in Abbildung 1 abgebildet ist und häufig auch als Duck-Curve bezeichnet wird, zeigt die stetige Zunahme von regenerativ erzeugtem Strom im deutschen Strommix, vor allem in den Nachmittagsstunden.

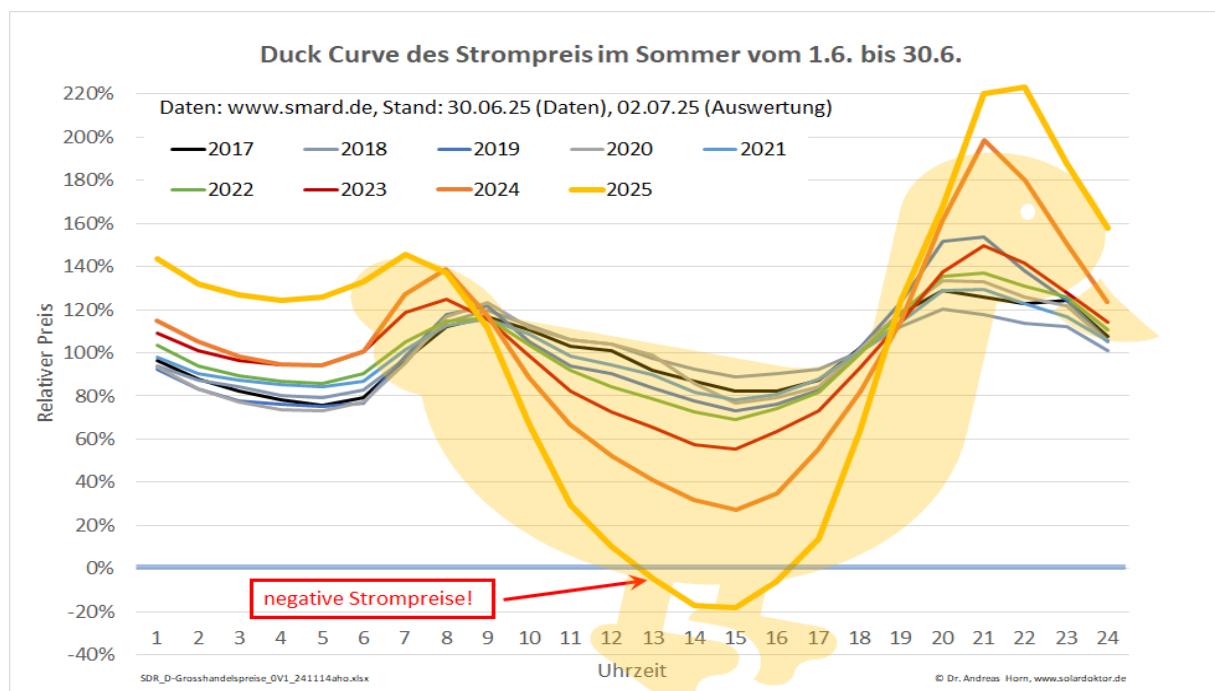


Abbildung 1: Strompreise im Tagesverlauf, Entwicklung 2017 - 2025

Da keine detaillierten Daten zur Kälteanlage und dem Bedarf vorhanden waren wurde eine Messkampagne über drei Woche im September 2025, in denen der Kälte- und Strombedarf für die Kälteerzeugung bei der Firma Dunkel durch die Factor4Solutions intensiv vermessen wurde, als Start in die Konzeptplanung vorgenommen. Allerdings war der Standort durch den Anschlag auf das lokale Stromnetz in der zweiten Woche vom Netz getrennt.

## Ergebnisse aus der Konzeptplanung

Die Ergebnisse der Vermessung brachten wichtige Randbedingungen und Informationen zum aktuellen Bedarf und Betrieb der Kälteerzeugung. Neben der Last und der Erzeugung sind vor allem der Tagesverlauf des Bedarfs mit dem Bezug zur Stromversorgung und bei diesem der Tagesverlauf der PV-Eigenstromproduktion ausgewertet worden. In Abbildung 2 ist der Strompreis des Day-Ahead Markts, über den auch die Strombezugskosten der Firma Dunkel definiert sind, dargestellt. Bei negativen Marktpreisen muss Dunkel zudem für die Einspeisung überschüssigen Stroms aus der Solaranlage zahlen.

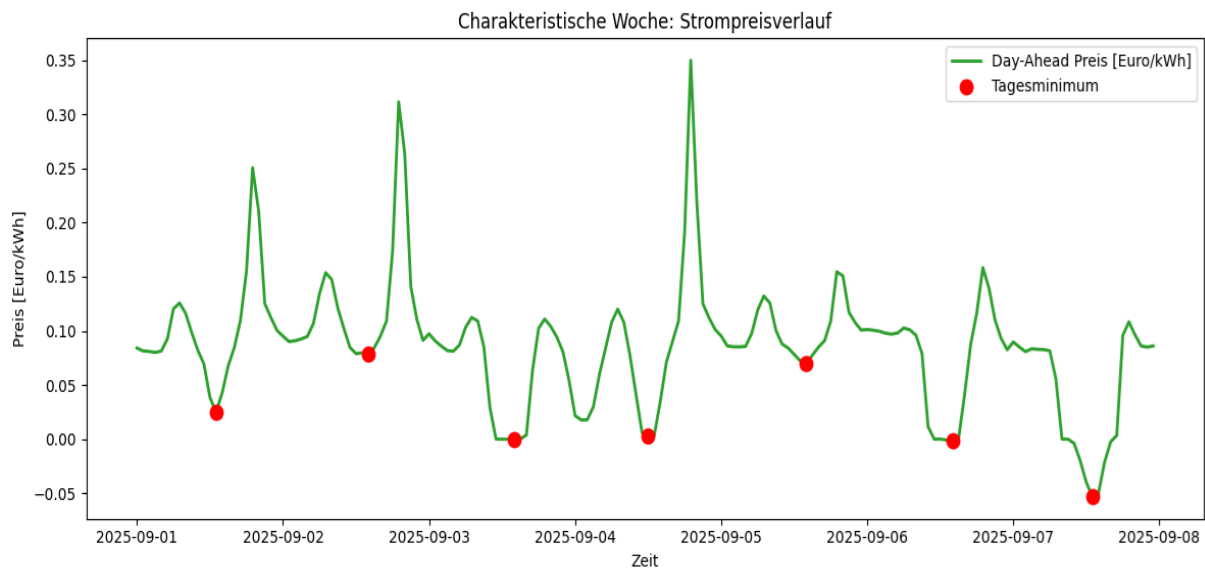


Abbildung 2: Verlauf des Strompreises (day-ahead Markt), Anfang September 2025

Die Ergebnisse wurden genutzt um digitale Zwillinge, die die Funktion der einzelnen Komponenten und des Systems hinsichtlich ihres Energiebedarfs abzubilden, um darauf aufbauend die Möglichkeit zu haben, das System auch im Betrieb über ein komplettes Jahr zu simulieren. Der Betrieb im Vermessungszeitraum wurde hälftig für die Modellbildung und hälftig für die Verifizierung der Modelle genutzt.

Die Speichergröße, als Kern der Untersuchung, ist in der Simulation variiert und hinsichtlich der unterschiedlichen Auswirkungen auf CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparungen und Gesamtkosten ausgewertet worden. Es ergibt sich an maximales Reduktionspotential von 73% in den Stromkosten und, einer Reduktion der korrelierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen in gleicher Größenordnung. Um dieses Ziel zu erreichen wäre ein PCM-Speicher mit einem Volumen von ca. 5 m<sup>3</sup> nötig. Bei größeren Speichern flacht der Mehrwert mit Zunahme der Speichergröße sensitiv ab. Kleiner Speicher führen zu einer höheren Wirtschaftlichkeit mit einem Maximum, dass bei einer Speichergröße von ca. 1 m<sup>3</sup> erreicht wird. Verringert man die Speichergröße darüber hinaus werden die spezifischen Installationskosten dominant und verschlechtern die Wirtschaftlichkeit.



Das PCM-Material, das Rubitherm für die Anwendung einsetzen möchte, hat eine ca. 15-fache Energiedichte im Vergleich zu einem Wasserspeicher, wie er üblicherweise für die Speicherung von Kälte eingesetzt wird. Damit kann die Baugröße und das Gewicht des Speichers deutlich reduziert werden. Durch die Verwendung des PCM-Speichers in diesem Projekt soll eine autonome Versorgung der Kältelast ohne Anlagenbetrieb von mindestens 3h und eine unterstützende Versorgung im Parallelbetrieb mit der Kälteanlage von bis zu 15h, beides bei voller Produktionskapazität der Firma Dunkel, gewährleistet werden.

## Weitere Informationen

Um den ersten Piloten zu realisieren und die generelle Funktionsweise bei vorteilhafter Amortisationszeit zu realisieren, hat sich die Firma Christian Dunkel GmbH im März 2026 zu einer Umsetzung des Projekts am Standort in Adlershof mit einem 1 m<sup>3</sup> großen PCM-Speicher der Firma Rubitherm und dem Energiesystemmanagement der Factor4Solutions entschieden. Die Technologiepartner unterstützten das Projekt mit eigenen Mitteln im Rahmen ihrer Produktentwicklung. Erste Betriebsdaten werden im Herbst/Winter 2026/27 erwartet.