

Wärmepumpen für die Industrie: Der Weg aus der Nische

Industrielle Wärmepumpen sind entscheidend, um Prozesswärme zu dekarbonisieren. Ihr Marktpotenzial wird bislang jedoch kaum ausgeschöpft. Forschende der ZHAW und der OST haben im Rahmen des vom BFE finanzierten Projekts SWEET DeCarbCH untersucht, warum der Markthochlauf stockt – und welche Hebel ihn beschleunigen könnten.

Technisch betrachtet sind industrielle Wärmepumpen heute ausgereift. Unterschiedliche Bauarten – von Hochtemperaturverdichtern über Kaskadensysteme bis hin zu transkritischen CO₂-Kreisläufen – decken Temperaturbereiche von 80 bis 200 Grad Celsius ab. In Kombination mit Abwärmenutzung, Wärmespeichern oder Photovoltaik können Systeme eine ganzjährige Versorgung sicherstellen.

Das theoretische Potenzial ist gross: Laut aktuellen technoökonomischen Analysen könnten in der Schweiz bis zu 700 Megawatt Prozesswärme durch industrielle Wärmepumpen bereitgestellt werden. Das entspricht mehreren Prozent des gesamten industriellen Energieverbrauchs. In der Praxis nutzen jedoch nur wenige Betriebe diese Möglichkeit.

Die Gründe sind vielfältig – und sie liegen nicht primär in der Technik. Das zeigt die Arbeit von Forschenden der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) und der Ostschweizer Fachhochschule (OST), die im Rahmen des vom Bundesamt für Energie (BFE) finanzierten Projekts SWEET DeCarbCH die Marktentwicklung untersuchen. Basierend auf Interviews und Workshops mit Schweizer Industrieunternehmen, Technologieanbietern und Forschenden des Projekts präsentieren sie ein dynamisches Wirkungsmodell, das die Zusammenhänge veranschaulicht, und diskutieren Handlungsoptionen.

Das Verhältnis von Strom- zu Gaspreis liegt in der Schweiz derzeit bei rund 2,5. Damit sich eine Wärmepumpe amortisiert, muss ihr COP (Coefficient of Performance) mindestens diesen Wert erreichen. Hinzu kommen hohe Anfangsinvestitionen und Engpässe bei Expertise und Fachkräften. Interviews



Beispiel einer industriellen Wärmepumpe in der Energiezentrale eines Schweizer Unternehmens.

deuten darauf hin, dass die Hürden nicht nur innerhalb der Unternehmen liegen, sondern auch bei Planern, Beratern, Technologieanbietern sowie aufseiten von Behörden, Politik und Kundschaft – ein Hinweis darauf, dass koordinierte Aktionen im Ökosystem die Diffusion beschleunigen können.

Welche Faktoren können den Ausschlag für einen Investitionsentscheid zugunsten industrieller Wärmepumpen geben? Die Auswertung der geführten Interviews zeigt eine Reihe von Faktoren: Die Entscheidung zugunsten industrieller Wärmepumpen wird nicht allein durch wirtschaftliche Überlegungen getrieben. Sie hängt vielmehr davon ab, ob die Unternehmen den sogenannten «Business-Case for Sustainability» erkennen, also Energieeffizienz, CO₂-Reduktion und stabile Betriebskosten als integralen Bestandteil ihrer Wettbewerbsfähigkeit verstehen. Ebenfalls wichtig ist, dass die Technologie als zuverlässig wahrgenommen wird und dass das für den Einsatz notwendige Know-how vorhanden ist oder aufgebaut wird.

Erfolg schafft Vertrauen

In ihrem Wirkmodell beschreiben die Forschenden Dynamiken innerhalb eines Unternehmens, die die Einführung

der Wärmepumpentechnologie fördern oder bremsen. Rahmenbedingungen wie Energiepreise oder Prozessanforderungen lassen sich kaum beeinflussen. Ausschlaggebend ist jedoch, welchen strategischen Stellenwert die Dekarbonisierung im Unternehmen hat. Sie bestimmt die Emissionsziele und die Toleranz bei den Wirtschaftlichkeitskriterien – und beeinflusst damit direkt den Business-Case für Wärmepumpen.

Die Forschenden beschreiben die Entwicklung als eine selbstverstärkende Rückkopplung. Eine erfolgreich betriebene Anlage schafft Vertrauen, eine schlecht ausgelegte oder unzuverlässige Anlage verstärkt die Skepsis. Zudem wirken verschiedene Rückkopplungen, die sich gegenseitig verstärken oder ausgleichen können:

Erreichen von Dekarbonisierungszielen: Je grösser die Lücke zwischen den gesetzten Emissionszielen und den tatsächlichen Emissionen, desto höher ist die Dringlichkeit, Massnahmen umzusetzen – etwa die Einführung von Wärmepumpen. Werden die Ziele jedoch erreicht, nimmt dieser Handlungsdruck wieder ab. Ambitionierte Zielsetzungen fördern somit die Verbreitung, während weniger ehrgeizige Zielvorgaben sie bremsen können.

Lokale Legitimierung: Viele Unternehmen stehen Wärmepumpen zunächst skeptisch gegenüber – aus Sorge vor Betriebsstörungen oder unzureichender Leistung. Bewährt sich die Technologie in der Praxis, stärkt das Vertrauen und begünstigt weitere Investitionen. Umgekehrt führen negative Erfahrungen zu verstärkten Vorbehalten. Bei kleinen und mittleren Unternehmen, die oft nur eine einzelne Anlage betreiben, hängt die Akzeptanz stark vom Erfahrungsaustausch innerhalb der Branche ab.

Lokales Lernen: Mit jeder implementierten Anlage entstehen neue Fähigkeiten im Unternehmen. Mitarbeitende werden geschult, Steuerungen angepasst und die Einsatzgrenzen der Technologie besser verstanden. Diese Erfahrungen fließen in künftige Projekte ein – etwa in die Prozessgestaltung oder die Integration ergänzender Technologien wie Photovoltaik oder Wärmespeicher – und erleichtern damit weitere Anwendungen. Auch auf der Ebene des gesamten Ökosystems wirken ähnliche Mechanismen. Einige Faktoren, die die Einführung von Wärmepumpen beeinflussen, liegen ausserhalb der Betriebe selbst und werden von der Angebotsseite geprägt.

Angebotsseitige Marktentwicklung: Forschung und Entwicklung führen dazu, dass Wärmepumpen leistungsfähiger und kostengünstiger werden. Dadurch erkennen mehr Unternehmen einen tragfähigen Business-Case und investieren. Planer, Berater, Installateure und Integratoren gewinnen dadurch prakti-

sche Erfahrung und erweitern ihre Kompetenzen. Besser geplante und umgesetzte Anlagen stärken das Vertrauen in die Technologie, und erfolgreiche Referenzprojekte wirken sich wiederum positiv auf künftige Investitionsentscheidungen aus.

Legitimierung im Ökosystem: Mit zunehmender Erfahrung steigt die Qualität der installierten Systeme, was ihre Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit unterstreicht. Gleichzeitig wird dieser Prozess dadurch gebremst, dass neue Produkte zunächst als weniger erprobt wahrgenommen werden.

Klare Handlungsempfehlungen

Aus den Ergebnissen der Arbeit und dem Wirkmodell leiten die Forschenden klare Handlungsempfehlungen ab: Strategisch geplante Dekarbonisierung schafft die Voraussetzung für eine gute Systemauslegung – inklusive Kompetenzaufbau und Integration ergänzender Technologien. Die Wahl des Implementierungs-

modells sollte vorausschauend erfolgen. Dienstleistungsbasierte Modelle wie «Heat-as-a-Service» oder «Decarbonization-as-a-Service» gewinnen an Bedeutung. Um die selbstverstärkenden Rückkopplungen zwischen Marktentwicklung und Legitimierung zu nutzen, empfiehlt sich ein orchestriertes Vorgehen. Dazu gehören eine gemeinsame Vision, ein Überblick über neue Angebote, definierte Schnittstellen zur Risikoreduktion – etwa in Form von Musterverträgen – sowie anerkannte Tools zur Wirtschaftlichkeitsprüfung und eine systematische Dokumentation neuer Geschäftsmodelle. ■

Matthias Speich, Silvia Ulli-Beer (ZHAW), Cordin Arpagaus, Frédéric Bless (OST)

► www.sweet-decarb.ch
Weiterführende Veröffentlichung:



Anzeige

ECOPLANET®

BAUEN IST
UNVERZICHTBAR.
EMISSIONEN NICHT.

Der klimafreundliche Zement
mit 390 kg eq CO₂/t.

Mehr erfahren unter:
holcimpartner.ch/de/ecoplanet

 **HOLCIM**

Vers la généralisation des pompes à chaleur industrielles

Les pompes à chaleur industrielles sont essentielles pour la décarbonation des procédés, mais leur marché reste sous-exploité. Des chercheurs de la ZHAW et de l'OST, via le projet SWEET DeCarbCH, ont analysé les obstacles au développement du marché et les moyens d'y remédier.

D'un point de vue technique, les pompes à chaleur industrielles sont aujourd'hui matures. Différents types de construction – des compresseurs à haute température aux systèmes en cascade, en passant par les cycles au CO₂ transcritiques – couvrent des plages de température de 80 à 200 degrés Celsius. Combinés à la récupération de chaleur fatale, aux stockages thermiques ou au photovoltaïque, ces systèmes peuvent assurer une alimentation tout au long de l'année.

Le potentiel théorique est important : selon de récentes analyses technico-économiques, jusqu'à 700 mégawatts de chaleur de procédé pourraient être fournis par des pompes à chaleur industrielles en Suisse. Cela correspond à plusieurs pourcentages de la consommation totale d'énergie de l'industrie. En pratique, cependant, seules quelques entreprises utilisent cette possibilité.

Les raisons sont multiples et ne relèvent pas principalement de la technique. C'est ce que montre le travail de chercheurs de la Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) et de la Ostschweizer Fachhochschule (OST), qui étudient l'évolution du marché dans le cadre du projet SWEET DeCarbCH financé par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Sur la base d'entretiens et d'ateliers avec des entreprises industrielles suisses, des fournisseurs de technologies et des chercheurs du projet, ils présentent un modèle d'impact dynamique qui illustre les interrelations et discutent des options d'action.

Le rapport entre le prix de l'électricité et celui du gaz est actuellement d'environ 2,5 en Suisse. Pour qu'une pompe à chaleur soit amortie, son COP (Coefficient de Performance) doit atteindre au moins cette valeur. S'ajoutent à cela des investissements initiaux élevés et des pénu-

ries d'expertise et de personnel qualifié. Les entretiens indiquent que les obstacles ne se situent pas seulement au sein des entreprises, mais aussi chez les planificateurs. Les conseillers, les fournisseurs de technologies ainsi que du côté des autorités, des politiques et de la clientèle y voient un signe que des actions coordonnées au sein de l'écosystème pourraient accélérer la diffusion.

Quels facteurs peuvent faire pencher la balance en faveur d'une décision d'investissement pour les pompes à chaleur industrielles ? L'analyse des entretiens menés révèle une série d'éléments : la décision en faveur des pompes à chaleur industrielles n'est pas uniquement motivée par des considérations économiques. Elle dépend plutôt du fait que les entreprises reconnaissent ou non le « Business Case for Sustainability », c'est-à-dire qu'elles comprennent l'efficacité énergétique, la réduction des émissions de CO₂ et la stabilité des coûts d'exploitation comme des éléments intégrants de leur compétitivité. Il est également important que la technologie soit perçue comme fiable et que l'expertise nécessaire à son déploiement soit disponible ou puisse être développée.

Le succès crée la confiance

Dans leur modèle d'impact, les chercheurs décrivent les dynamiques au sein d'une entreprise qui favorisent ou freinent l'adoption de la technologie des pompes à chaleur. Les conditions cadres, telles que les prix de l'énergie ou les exigences des procédés, sont difficilement influençables. Cependant, la place stratégique accordée à la décarbonation dans l'entreprise est déterminante. Elle définit les objectifs d'émissions et la tolérance en matière de critères de rentabilité et influence ainsi directement le business case pour les pompes à chaleur.



Exemple d'une pompe à chaleur industrielle dans la centrale énergétique d'une entreprise suisse.

Les chercheurs décrivent le développement comme une boucle de rétroaction auto-renforçante. Une installation exploitée avec succès crée de la confiance, tandis qu'une installation mal dimensionnée ou peu fiable renforce le scepticisme. De plus, diverses boucles de rétroaction agissent, pouvant se renforcer ou s'équilibrer mutuellement :

Atteinte des objectifs de décarbonisation : plus l'écart entre les objectifs d'émissions fixés et les émissions réelles est important, plus l'urgence de mettre en œuvre des mesures – comme l'installation de pompes à chaleur – est grande. Cependant, une fois les buts atteints, la pression pour agir diminue. Des ambitions élevées favorisent ainsi la diffusion, tandis que des cibles moins exigeantes peuvent la freiner.

Légitimation locale : de nombreuses entreprises sont initialement sceptiques vis-à-vis des pompes à chaleur par crainte de perturbations de fonctionnement ou de performances insuffisantes. Si la technologie fait ses preuves en pratique, cela renforce la confiance et favorise de nouveaux investissements. Inversement, des expériences négatives entraînent des réserves accrues. Pour les petites et moyennes entreprises, qui

n'exploitent souvent qu'une seule installation, l'acceptation dépend fortement de l'échange d'expériences au sein de la branche.

Apprentissage local : chaque installation mise en service génère de nouvelles compétences au sein de l'entreprise. Le personnel est formé, les systèmes de contrôle sont adaptés et les limites d'utilisation de la technologie sont mieux comprises. Ces expériences sont intégrées dans les projets futurs, par exemple dans la conception des procédés ou l'intégration de technologies complémentaires, comme le photovoltaïque ou le stockage thermique, facilitant ainsi de nouvelles applications. Des mécanismes similaires sont à l'œuvre au niveau de l'ensemble de l'écosystème. Certains facteurs influençant l'adoption des pompes à chaleur se situent en dehors des entreprises elles-mêmes et sont façonnés par l'offre.

Développement du marché côté offre : la recherche et le développement rendent

les pompes à chaleur plus performantes et moins chères. Ainsi, davantage d'entreprises identifient un business case viable et investissent. Les planificateurs, conseillers, installateurs et intégrateurs gagnent une expérience pratique et élargissent leurs compétences. Des installations mieux planifiées et réalisées renforcent la confiance dans la technologie, et les projets de référence réussis ont un impact positif sur les futures décisions d'investissement.

Légitimation dans l'écosystème : avec l'accumulation d'expérience, la qualité des systèmes installés s'améliore, ce qui souligne leur fiabilité et leurs performances. Dans le même temps, ce processus est freiné par le fait que les nouveaux produits sont initialement perçus comme moins éprouvés.

Des recommandations d'action claires

Les chercheurs formulent des préconisations précises : une décarbonisation pla-

nifiée est essentielle pour concevoir des systèmes performants, intégrant compétences et technologies complémentaires. Le choix du mode de déploiement doit être anticipé, en privilégiant les modèles de service comme « Heat-as-a-Service » ou « Decarbonization-as-a-Service ». Une approche coordonnée est nécessaire pour renforcer la dynamique marché-légitimation, via une vision partagée, des interfaces standardisées, des outils d'analyse financière reconnus et une capitalisation des nouveaux modèles économiques. ■

**Matthias Speich, Silvia Ulli-Ber (ZHAW)
Cordin Arpagaus, Frédéric Bless (OST)**

► www.sweet-decarb.ch
Publication complémentaire
(en allemand):



Annonce

ECOPLANET®

LA CONSTRUCTION
EST INDISPENSABLE.
LES ÉMISSIONS
NE LE SONT PAS.

Le ciment respectueux du climat
avec 390 kg eq CO₂/t.

Pour en savoir plus:
holcimpartner.ch/fr/ecoplanet

 **HOLCIM**