



Schlussbericht vom 30.06.2019

Leitfaden zur industriellen Abwärmenutzung



Mit industrieller Abwärme können Energiebedürfnisse in der Umgebung gedeckt werden. Die Sefar AG in Heiden speist einen Teil ihrer Abwärme in das Fernwärmenetz der Gemeinde ein, welches Wohnquartiere, Schulhäuser, Unternehmen, ein Spital und zwei Schwimmbäder mit Wärme versorgt.



Datum: 30.06.2019

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw
www.hslu.ch

Autor/in:

Lorenz Rast, Michael Oester, Peter Liem, Mario Mayer, Yasmina Abdelouadoud, Prof. Joachim Ködel,
Diego Hangartner, Thomas Heim
Prof. Dr. Beat Wellig, beat.wellig@hslu.ch

BFE-Projektbegleitung: Dr. Carina Alles, carina.alles@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501425-1

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Industrieunternehmen müssen heute vielfältige Anforderungen erfüllen. Die Produktionsprozesse sollen nicht nur maximale Wirtschaftlichkeit aufweisen, sondern auch so wenig Energie und Ressourcen wie möglich verbrauchen und geringe Emissionen erzeugen. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen sich industrielle Grossunternehmen und KMUs verstärkt mit der Erhöhung der Energieeffizienz beschäftigen. Obwohl die Schweizer Industrie in den vergangenen Jahren in diesem Bereich grosse Anstrengungen unternommen hat, werden nach wie vor beträchtliche Mengen an Abwärme ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Das Abwärmepotenzial von Unternehmen kann genutzt werden, um ökonomische und ökologische Ziele zu verfolgen. Oftmals sind aber den Verantwortlichen in den Unternehmen die Möglichkeiten und Herausforderungen für eine erfolgreiche Abwärmenutzung nicht bekannt.

In diesem Projekt wurde ein Leitfaden zur industriellen Abwärmenutzung für technische Fachleute aus Industrieunternehmen und Ingenieurbüros entwickelt. Der Leitfaden unterstützt die Analyse von Abwärmepotenzialen sowie die Konzeption geeigneter Lösungen. Um die praktische Anwendbarkeit des Leitfadens sicherzustellen, wurden Fallbeispiele beleuchtet und zwei Workshops mit Vertretern aus Industrieunternehmen, Ingenieurbüros und Energieversorgungsunternehmen durchgeführt.

Den Kern des Leitfadens bilden 5 Schritte, mit denen ein systematisches Vorgehen für die Erarbeitung von Lösungen zur Abwärmenutzung beschrieben werden. Spezifische Merkblätter im Anhang informieren detaillierter über einzelne Themen. Fallbeispiele zu verschiedenen Aspekten der Abwärmenutzung runden den Leitfaden ab.

Schritt 1 des Leitfadens beinhaltet die Analyse des energetischen Ist-Zustands, welche einen transparenten Überblick über den Energiehaushalt des Unternehmens schafft. In Schritt 2 werden Energieeffizienz-Massnahmen erarbeitet und bewertet. Mit deren Umsetzung wird der Energiebedarf des Unternehmens und gleichzeitig auch die Abwärme reduziert. Energieeffizienz-Massnahmen haben immer erste Priorität, sie sind der Abwärmenutzung vorzuziehen.

Die Schritte 3 bis 5 beinhalten den Umgang mit der nicht vermeidbaren Abwärme. Schritt 3 befasst sich mit der Charakterisierung der Abwärme und mit der Umgebungsanalyse. Daraus werden Nutzungsmöglichkeiten für die vorhandene Abwärme abgeleitet. In diesem Schritt werden die vier Nutzungsmöglichkeiten für Abwärme beleuchtet: Nutzung durch direkte Wärmeübertragung, Nutzung durch eine Temperaturerhöhung, Nutzung zur Stromerzeugung und für die Kälteerzeugung. Das Ziel von Schritt 4 ist die Erarbeitung von technischen Konzepten zur Abwärmenutzung. Dabei werden Aspekte wie zum Beispiel Auskopplung, Transport, Speicherung und Ergänzung/Redundanz behandelt. In Schritt 5 werden schliesslich kommerzielle Konzepte und Geschäftsmodelle für die erarbeiteten technischen Lösungen dargestellt und die Gesamtlösungen umfassend evaluiert. Risiken werden bewertet und entsprechende Massnahmen vorgeschlagen.

Eine erfolgreiche industrielle Abwärmenutzung hängt von vielen Faktoren ab. Der Leitfaden beschreibt ein mögliches, systematisches Vorgehen, um die objektive und rationelle Auswahl geeigneter Lösungen zur Abwärmenutzung zu unterstützen. Nach Abschluss dieses Projekts liegt der Leitfaden als Entwurfsdokument vor. Für eine breitere Veröffentlichung müssen das Layout und die Grafiken aufbereitet werden. Zudem ist vorgesehen, eine ergänzende, kurze Broschüre für Entscheidungsträger in Industrieunternehmen zu erarbeiten.



Summary

Guidelines for the use of industrial waste heat

Industrial companies of today face a variety of challenging business requirements. The production processes not only have to maximize profitability, but also have to use as little energy and resources as possible in addition to maintaining low emissions. In order to remain competitive, large-scale industrial enterprises and SMEs must focus on increasing energy efficiency. Although Swiss industry has made great efforts in this area in recent years, considerable amounts of waste heat are still being released into the environment. The potential for use of this waste heat can enable companies to better pursue their economic and ecological goals. Often, however, management and the individuals responsible for the energy systems in the companies are not aware of the possibilities and challenges for successful waste heat use.

In this project, guidelines for the proper use of industrial waste heat have been developed to aid technical engineering professionals from industrial companies and engineering offices. The guidelines support the analysis of waste heat potential as well as the conception of suitable solutions and designs. In order to ensure the practicality of the guidelines, case studies were examined and two workshops were conducted with representatives from industrial companies, engineering firms and energy supply companies.

The central aspect of the guidelines consists of 5 steps that describe a systematic approach to the development of waste heat use and solutions. Specific information sheets in the appendix provide more detailed information on individual topics. To complete the guidelines, case studies illustrating the various aspects of waste heat use have been provided.

Step 1 of the guidelines involves the analysis of the present state for energy usage in order to provide a transparent overview of the entire company's energy use. In step 2, energy efficiency measures are developed and evaluated. Through the implementation of such measures, both the energy requirement of a company and the amount of waste heat are reduced. Energy efficiency measures always have top priority and are preferable to measures for waste heat utilization.

Steps 3 to 5 deal specifically with the handling of unavoidable waste heat. In step 3, the characterization of the waste heat along with an analysis of the surroundings are done. From these two aspects, possible uses for the available waste heat are derived. In addition, the four possibilities for waste heat use are highlighted: use by direct heat transfer, use by temperature lift, use for power generation and use for refrigeration. The goal of step 4 is the development of actual technical concepts necessary for waste heat use. It deals with aspects such as decoupling, transfer, storage and supplementation and/or redundancy. Finally, in step 5, commercial concepts and business models for the developed technical solutions are presented and the overall solutions are evaluated in detail. Also risks are assessed and any appropriate risk management measures are proposed.

Successful industrial waste heat use depends on many factors. These guidelines describe a possible, systematic procedure to support the objective and rational selection of suitable solutions for waste heat utilization. After completion of this project, the guidelines will be available as a draft document. For a wider publication, the layout and graphics must still be prepared. As a supplement, it is planned to develop a short brochure for decision-makers in industrial companies.



Résumé

Manuel sur la valorisation des rejets thermiques

Aujourd'hui, l'industrie doit répondre à de multiples exigences. Les processus de production doivent non seulement assurer une rentabilité maximale, mais aussi consommer le moins d'énergie et de ressources possibles et générer peu d'émissions. Pour rester compétitives, les grandes entreprises et PME doivent de plus en plus augmenter leur efficacité énergétique. Malgré les importants efforts concédés par l'industrie suisse ces dernières années dans ce domaine, une quantité considérable de rejets thermiques est rejetée dans l'environnement. Ce potentiel de rejets thermiques peut être valorisé et permettre aux entreprises d'atteindre leurs objectifs économiques et écologiques. Cependant, bien souvent, les personnes compétentes dans l'entreprise ne connaissent pas les possibilités ni les difficultés liées à la valorisation efficace de ces rejets.

Dans le cadre de ce projet, un manuel sur la valorisation des rejets thermiques industriel a été créé, lequel s'adresse aux techniciens spécialisés des entreprises industrielles et des bureaux d'études. Ce manuel les accompagne dans l'analyse des potentiels des rejets thermiques et dans la conception de solutions adaptées. Afin de garantir la praticabilité du manuel, des études de cas ont été présentées et deux workshops avec des représentants d'entreprises industrielles, de bureaux d'études et de fournisseurs d'énergie ont été organisés.

Le fil conducteur du manuel sont les 5 étapes qui décrivent une approche systématique permettant l'élaboration de solutions de valorisation des rejets thermiques. En annexe, des fiches spécifiques fournissent des informations plus détaillées sur chacun des thèmes. Enfin, des cas d'études illustrant différents aspects de la valorisation des rejets thermiques complètent le manuel.

La première étape du manuel contient l'analyse de la situation énergétique actuelle et donne une vue d'ensemble transparente sur la gestion de l'énergie dans l'entreprise. La deuxième étape consiste à élaborer et à évaluer des mesures d'efficacité énergétique. Leur mise en œuvre réduira le besoin énergétique et, par conséquent, les rejets thermiques de l'entreprise. Les mesures d'efficacité énergétique doivent toujours avoir la priorité absolue par rapport à la valorisation des rejets thermiques.

Les étapes 3 à 5 décrivent l'utilisation des rejets thermiques qui ne peuvent être récupérées. La troisième étape est consacrée à la caractérisation des rejets thermiques et à l'analyse de l'environnement du site. De cette analyse en découlent des possibilités de valorisation des rejets thermiques existantes. Cette étape décrit les quatre possibilités de valorisation des rejets thermiques: la valorisation directe de chaleur, la valorisation indirecte de chaleur par augmentation de la température, la valorisation pour la production d'électricité et la valorisation pour le refroidissement. L'étape 4 vise à élaborer des concepts techniques pour la valorisation des rejets thermiques. Elle traite différents aspects, tels que l'extraction, le transport, le stockage et l'appoint/la redondance. Au final, la cinquième étape propose des concepts et modèles d'affaire correspondant aux solutions techniques élaborées et évalue les solutions dans leur intégralité. Elle permet d'estimer les risques et suggère des mesures ad hoc.

La valorisation des rejets thermiques industriel dépend de nombreux facteurs. Le manuel décrit un processus systématique possible qui aide à choisir de manière objective et rationnelle des solutions adaptées de valorisation des rejets thermiques. À l'issue de ce projet, le manuel sera disponible en version préliminaire. Il sera nécessaire d'effectuer la mise en page et de retravailler les graphiques avant toute publication. L'élaboration d'une courte brochure complémentaire destinée aux preneurs de décisions des entreprises industrielles est également prévue.



Take-home messages

- Das Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz in der Industrie und zur Nutzung industrieller Abwärme ist beträchtlich.
- Die Umsetzung von Energieeffizienz-Massnahmen in Industrieunternehmen hat immer Vorrang vor der Abwärmenutzung.
- In vielen Fällen lohnt es sich, das Potenzial zur Effizienzsteigerung und Abwärmenutzung zu analysieren und Massnahmen abzuleiten.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Summary	4
Résumé.....	5
Take-home messages	6
Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung	8
1.1 Ausgangslage.....	8
1.1.1 Hintergrund.....	8
1.1.2 Definition "industrielle Abwärme".....	8
1.1.3 Energieeinsatz in der Schweizer Industrie	9
1.2 Motivation des Projektes	11
1.3 Projektziele	11
2 Vorgehen	12
3 Ergebnisse der Workshops	13
4 Aufbau des Leitfadens	15
5 Schlussfolgerungen	17
6 Weiteres Vorgehen und Ausblick	18
7 Literaturverzeichnis	19
8 Anhang	20

Abkürzungsverzeichnis

AWN	Abwärmennutzung
BFE	Bundesamt für Energie
EEM	Energieeffizienz-Massnahmen
EnAW	Energieagentur der Wirtschaft
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
ORC	Organic Rankine Cycle
WRG	Wärmerückgewinnung



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

1.1.1 Hintergrund

Industrieunternehmen müssen heute vielfältige Anforderungen erfüllen. Die Produktionsprozesse sollen nicht nur maximale Wirtschaftlichkeit aufweisen, sondern auch so wenig Energie und Ressourcen wie möglich verbrauchen und geringe Emissionen erzeugen. Zudem führen mittel- bis langfristig steigende Energiepreise und Lenkungsabgaben dazu, dass die Erhöhung der Energieeffizienz für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit unabdingbar wird.

Die Schweizer Industrie hat in den vergangenen Jahren grosse Anstrengungen unternommen, um die Energieeffizienz zu steigern und CO₂-Emissionen zu reduzieren. Trotz Umsetzung vielfältiger Energieeffizienz-Massnahmen (EEM) werden grosse Mengen an Abwärme an die Umgebung abgegeben. Die gezielte Nutzung dieser Abwärme weist, in einer weiter gefassten Systemgrenze, ein substantielles Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz und Reduktion von CO₂-Emissionen auf.

In diesem BFE-Projekt wurde die industrielle Abwärmenutzung (AWN) untersucht. Der erarbeitete Leitfaden soll Entscheidungsträgern aus Industrieunternehmen und Ingenieurbüros helfen, Abwärmepotenziale zu erkennen und geeignete Lösungen zur Awn auszuwählen und umzusetzen.

1.1.2 Definition "industrielle Abwärme"

Die Basis für die Definition von „Abwärme“ bildet Art.1.g der Energieverordnung [1]:

"Abwärme: nach dem Stand der Technik nicht vermeidbare Wärmeverluste, die aus Energieumwandlungs- oder chemischen Prozessen (u. a. Kehrlichtverbrennungsanlagen) entstehen, ausgenommen Heizwärme aus Anlagen, welche die gekoppelte Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie als primäre und gleichrangige Ziele haben."

Der Fokus dieses Projekts liegt auf der Nutzung **industrieller Abwärme**, also *nicht vermeidbare Abwärme*, die von Industrieunternehmen nach der Umsetzung von **Energie-Effizienzmassnahmen (EEM)** nach dem Stand der Technik an die Umgebung abgeführt wird. Die Wiederverwendung des bei Industrieprozessen entstehenden Wärmeangebots innerhalb des Unternehmens oder des Industrieareals wird als **Wärmerückgewinnung (WRG)** bezeichnet. Möglichkeiten und Massnahmen zur direkten und indirekten Wärmerückgewinnung können mittels Pinch-Analysen systematisch identifiziert und umgesetzt werden [2]. Mit der Pinch-Analyse lässt sich systematisch aufzeigen, wie die Energieströme in einer Gesamtbetrachtung der betrieblichen Prozesse verknüpft werden müssen, um eine hohe Effizienz bei minimalen Kosten zu erreichen. Aus den Ergebnissen der Analyse können Massnahmen zur Wärmerückgewinnung und verbesserten Energieversorgung abgeleitet werden.

Zu unterscheiden ist hiervon die **industrielle Awn**. Die nach Umsetzung von EEM (wie z.B. WRG) nicht weiter reduzierbare Abwärme soll entweder direkt genutzt, mittels Wärmepumpen auf ein höheres Temperaturniveau angehoben werden oder durch Energieumwandlung in Strom oder Kälte umgewandelt werden.

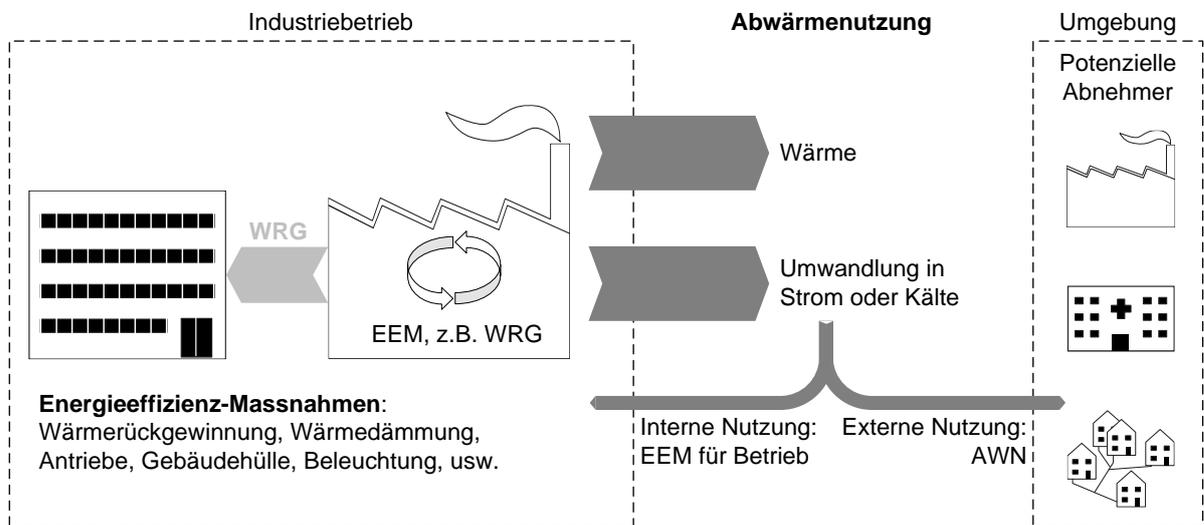


Abbildung 1: Definition von Energieeffizienz-Massnahmen (EEM), Wärmerückgewinnung (WRG) und Abwärmenutzung (AWN)

Gemäss einem Faktenblatt [3] des BFE gilt die Abwärme als CO₂-neutral, da die Nutzung von Abwärme in einer weiter gefassten Systemgrenze eine Reduktion des Primärenergiebedarfs nach sich zieht. Da zudem die Abwärme keiner Primärenergie zugeordnet werden kann, enthält diese auch keine Treibhausgasemissionen. Jedoch sind der Energieaufwand, welcher notwendig ist um die Abwärme nutzbar zu machen sowie allfällige Spitzendeckungen von dieser Betrachtung auszuschliessen.

Nutzung von Abwärme ist prinzipiell erst dann vorzusehen, wenn alle vertretbaren Möglichkeiten zur Vermeidung von Abwärme sowie zur effizienten Energiebedarfsdeckung ausgeschöpft sind. Im Industriebereich stehen die Produktion und deren Rationalisierung im Vordergrund. AWN-Massnahmen sind – selbst bei hohen Investitionskosten – unter bestimmten Voraussetzungen wirtschaftlich, so dass sowohl beim Bau von neuen Anlagen als auch bei Erneuerungen oder Erweiterungen immer seriöse Vorabklärungen durchgeführt werden sollten [4]. Der erarbeitete Leitfaden soll die Vorabklärungen unterstützen.

1.1.3 Energieeinsatz in der Schweizer Industrie

Der Endenergiebedarf der Schweizer Industrie betrug im Jahr 2017 rund 43.9 TWh, wovon knapp 55% für Prozesswärme aufgewendet wurden [5]. Der Anteil am Brennstoffverbrauch für die Prozesswärme lag bei rund 70%, was einem Energiebedarf von 18.2 TWh entspricht. Die seit 1978 dokumentierten Daten zum Endenergiebedarf zeigen, dass der Prozesswärmebedarf der Industrie stets rund 55% des Gesamtenergiebedarfs betrug.

Den grössten Anteil am Gesamtenergiebedarf weist mit rund 30% die Chemie- und Pharma-Branche auf, gefolgt von den Branchen Mineralien (18%), Nahrung (14%), Metalle (12%) und Papier (9%). Die übrigen Branchen beanspruchen zusammen einen Anteil von rund 17% des Gesamtenergiebedarfs.

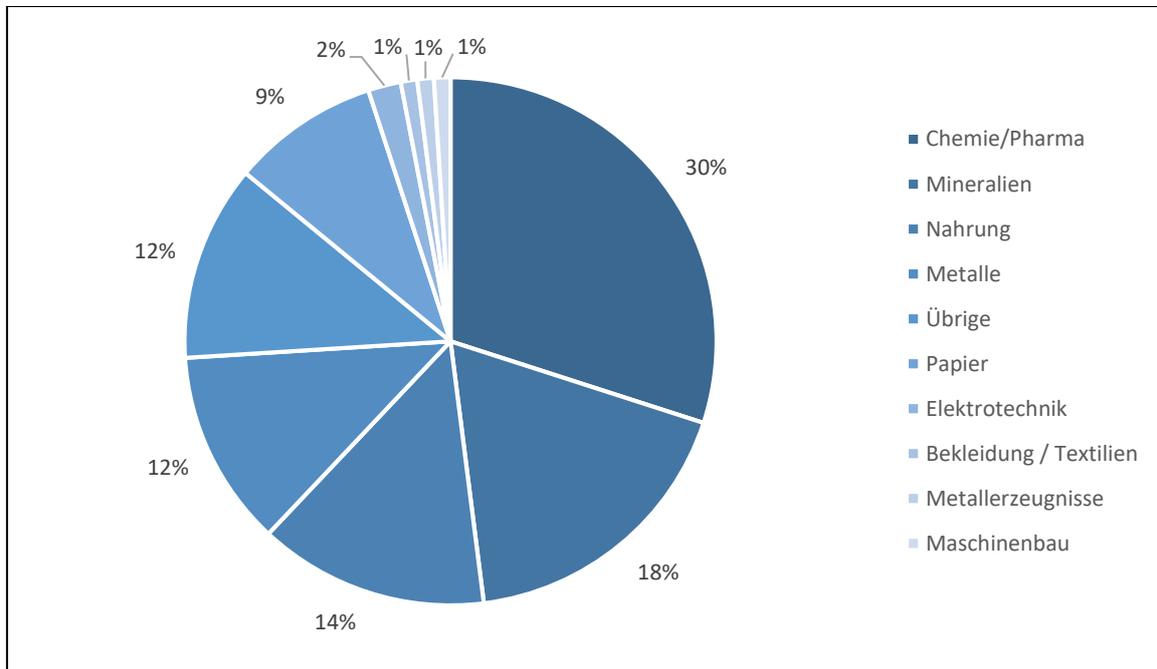


Abbildung 2: Prozentuale Anteile der Branchen am Endenergieverbrauch für die Prozesswärme (Quelle: [5])

In der im Auftrag des BFE erarbeiteten Studie zu den Energieperspektiven für die Schweiz bis im Jahr 2050 wird angenommen, dass die Energienachfrage nach Prozesswärme in den Sektoren Industrie & Dienstleistungen im Szenario "Neue Energiepolitik" um gut ein Drittel gegenüber dem Szenario "Weiter wie Bisher" sinkt [6]. Um dieses Potenzial auszuschöpfen, müssen beispielsweise innovative Technologien zur Substitution energieintensiver Prozesse und Massnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz entwickelt und implementiert werden.

Obwohl die Schweizer Industrie in den vergangenen Jahren in diesem Bereich grosse Anstrengungen unternommen hat und durch die Umsetzung von EEM der Energiebedarf deutlich reduziert wurde, ist die Menge an industrieller Abwärme erheblich.

Die Abwärmemenge mit einer Temperatur von über 60°C wurde für das Jahr 2014 auf 3.6 TWh geschätzt [7]. Eine umfassende Abschätzung des Abwärmepotenzials für die Schweiz wurde bislang nicht durchgeführt. Miro et al. [8] haben in einer aktuellen Studie die Abwärmemenge für Deutschland und Österreich auf ca. 20% ihres Endenergieverbrauchs geschätzt. Ausgehend von einem Endenergieverbrauch der Schweizer Industrie von 43.9 TWh ergibt sich mit diesem Wert ein Abwärmepotenzial von rund 8.8 TWh. Davon werden bislang ca. 1-2 TWh/a in thermische Netze¹ eingespeist. Der durch ORC-Anlagen zur Stromerzeugung genutzte Anteil ist mit 0.25 TWh noch deutlich geringer.

¹ Der Begriff "Thermische Netze" wird hier, im Einklang mit dem von EnergieSchweiz unterstützten Programm "Thermische Netze", übergeordnet für die Bezeichnungen von Fernwärme, Fernkälte, Nahwärme und Anergienetze verwendet [9].



1.2 Motivation des Projektes

Vor diesem Hintergrund ergibt sich die Motivation zur Erstellung eines Leitfadens zur industriellen AWN:

(1) Der Anteil der heute genutzten industriellen Abwärme ist gering. Auch nach der Umsetzung von EEM werden von Industrieunternehmen weiterhin grosse Abwärmemengen ungenutzt an die Umgebung abgeführt. Im Rahmen der Energiestrategie 2050 ist es notwendig, Potenziale zur Nutzung industrieller Abwärme zu identifizieren und zu erschliessen.

Neben der Identifizierung und Charakterisierung von Abwärmequellen ist für deren Nutzung eine Analyse technisch geeigneter Lösungen und Verwendungszwecke notwendig. Aus der Literatur sind verschiedene Anwendungsmöglichkeiten zur industriellen AWN bekannt, wie z.B. die Einspeisung in thermische Netze oder die Stromproduktion mittels ORC- Anlagen.

(2) Eine Methodik für die systematische Analyse technischer und kommerzieller Konzepte, die einen ganzheitlichen und objektiven Entscheidungsprozess unterstützt, ist zurzeit nicht vorhanden.

Verschiedene in der Schweizer Industrie durchgeführte Pinch-Analysen zeigen die Herausforderungen bei der Nutzung von Abwärmequellen auf. Den Verantwortlichen sind die Möglichkeiten und die erforderlichen Randbedingungen für eine Nutzung von Abwärme oft nicht bekannt. Industrielle Abwärme wird nicht als ein unter Umständen "vermarktbares" Nebenprodukt erkannt bzw. AWN-Projekte werden vorschnell als wirtschaftlich nicht umsetzbar erachtet. Ein praxisbezogener Leitfaden, der die Bedürfnisse eines Industrieunternehmens unter seinen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und seiner strategischen Ausrichtung berücksichtigt, stellt eine Lücke dar.

1.3 Projektziele

Das Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines Leitfadens zur Identifizierung und Charakterisierung industrieller Abwärmepotenziale sowie zur Auswahl und Konzeption von Lösungen zur industriellen AWN.

Der resultierende Leitfaden wird in Form eines Dokuments erstellt und beschreibt ein systematisches Vorgehen, um die objektive und rationelle Auswahl geeigneter Lösungen zur AWN zu unterstützen. Um die pragmatische und praxisnahe Entwicklung des Leitfadens sicherzustellen, wird das Projekt von einer Begleitgruppe mit Vertretern von Industrieunternehmen, Ingenieurbüros, Energieversorgern sowie Experten der Energieagentur der Wirtschaft (EnAW) und des BFE unterstützt und durch Fallbeispiele aus der Schweizer Industrie ergänzt. Spezifische Merkblätter informieren detaillierter über einzelne Themen, die im Leitfaden behandelt werden.

Die Hauptziele des Leitfadens können folgendermassen zusammengefasst werden:

- **Sensibilisierung** des Anwenders auf die Chancen und Möglichkeiten einer industriellen AWN. Es wird aufgezeigt, welche Wege zur Identifizierung, Charakterisierung und Nutzung von Abwärme beschritten werden können.
- **Übersicht schaffen:** Im Leitfaden wird eine Methodik vorgestellt, die es dem Anwender ermöglicht, eine Übersicht über Wärmeangebote und Wärmesenken im Betrachtungsperimeter zu erhalten. Mustertopologien unterstützen den Leitfaden-Nutzer bei der Wiedererkennung in seinem spezifischen Umfeld und ermöglichen eine reduzierte und zielgeführte Auswahl an relevanten Informationen.



- **Konzeption:** Der Leitfaden enthält eine Entscheidungshilfe zur Auswahl der geeigneten Lösung für die AWN. Darin enthalten sind Beschreibungen zur Auskopplung, Verteilung, Speicherung und Umwandlung der Abwärme. Es wird aufgezeigt, wie eine Grobauswahl technischer und kommerzieller Lösungen vorgenommen werden kann. Ausserdem werden verschiedene Geschäftsmodelle und Risiken für ein AWN-Projekt beschrieben.

2 Vorgehen

Zur Erreichung der beschriebenen Zielsetzung wurde folgendes Vorgehen gewählt:

I. Grundlagenrecherche

Es wurde eine umfassende Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Forschung bezüglich der Nutzung industrieller Abwärme durchgeführt und das Verständnis für Erfolgsfaktoren und Hemmnisse der AWN erarbeitet. Basierend auf der Recherche wurden die Anforderungen an den Leitfaden erarbeitet.

II. Anforderungen an den Leitfaden

Um den Leitfaden so praxisnah wie möglich zu gestalten und die Bedürfnisse der Anwenderinnen und Anwender bestmöglich zu berücksichtigen, wurde mit Vertretern von Industrieunternehmen, Ingenieurbüros, Energieversorgern sowie Experten der EnAW und des BFE ein Workshop organisiert. In diesem Workshop wurden insbesondere die Erfolgsfaktoren und Hemmnisse für industrielle AWN thematisiert. Ergebnis des Workshops war ein umfassender Anforderungskatalog an den Leitfaden, welcher die Basis für die folgenden Schritte bildete.

III. Abwärmequellen in der Industrie

In diesem Schritt wurde eine klare Abgrenzung zwischen den EEM und der AWN auf Basis der Definition von "Abwärme" erarbeitet. Danach wurden Methoden zur Identifikation und Charakterisierung von industriellen Abwärmequelle(n) und der möglichen Verwendungszwecke entwickelt.

IV. Technische Konzeption

Es wurden Methoden zusammengestellt, die technische Fachleute in Industriebetrieben und KMUs bei der Erarbeitung und Evaluation technischer Lösungen für die AWN unterstützen. Hierzu wurden Recherchen zu den technischen Lösungen und zu den rechtlichen Bedingungen und Normen durchgeführt. Um eine pragmatische Entwicklung der Methodik sicherzustellen und ihre Anwendung in der Praxis zu erleichtern, wurden Fallbeispiele untersucht und die Erfahrungen aus bereits durchgeführten AWN-Projekten eingearbeitet.

V. Kommerzielle Konzeption

In diesem Schritt wurden Konzepte zur Erarbeitung kommerzieller Lösungen entwickelt. Aufbauend auf einer Stakeholder-Analyse wurden Rollen und Akteure identifiziert und mögliche Geschäftsmodelle beschrieben. Ausserdem wurde eine Recherche zu Fördermöglichkeiten durchgeführt und Methoden zum Umgang mit Risiken und der Evaluation der AWN-Konzepte erarbeitet.



VI. Erarbeitung des Leitfadens

Basierend auf den Ergebnissen den vorhergehenden Schritten wurde der gesamte Prozess zur Identifikation, Erarbeitung und Bewertung von Lösungen zur AWN beschrieben und im Leitfaden zusammengefasst. Im Rahmen eines zweiten Workshops mit Vertretern aus Industrieunternehmen, Ingenieurbüros, Energieversorgern sowie Experten der EnAW und des BFE wurde ein vorab zur Verfügung gestellter Entwurf des Leitfadens diskutiert und das Feedback in einem iterativen Prozess in die finale Version des Leitfadens eingearbeitet.

3 Ergebnisse der Workshops

Nachfolgend werden die Ergebnisse der beiden Workshops kurz beschrieben. Die detaillierte Dokumentation befindet sich im Anhang.

Workshop 1:

Am 8. November 2017 fand der erste Workshop statt, in welchem Vertreter von Industrieunternehmen, Ingenieurbüros, Energieversorgern sowie Experten der EnAW und des BFE gebeten wurden, ihre Wünsche und Anforderungen an einen Leitfaden zur industriellen AWN einzubringen. Konkret standen folgende zwei Fragestellungen im Zentrum:

- "Was sind aus Ihrer Sicht die wesentlichen Treiber/fördernden Faktoren und Hemmnisse/Hindernisse für die industrielle AWN?"
- "Was sind aus Ihrer Sicht die Wünsche und Anforderungen an einen Leitfaden zur industriellen AWN?"

Wesentliche Ergebnisse aus der Diskussion zur ersten Fragestellung sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Fördernde Faktoren	Hemmnisse
<ul style="list-style-type: none">- richtiger Zeitpunkt für die Lancierung des AWN-Projektes- entsprechendes Leitbild und Umweltbewusstsein des Unternehmens- wenn ein Energierichtplan / Gestaltungsplan mit Anschlussverpflichtung für Fernwärme auf kommunaler Ebene vorliegt- Geschäftsmodelle, bei welchen ein Contractor die Projektfinanzierung sowie den Betrieb und Unterhalt der AWN übernimmt- gute Auftrags- und Wirtschaftslage des Industrieunternehmens- wenn die AWN zeitgleich mit einer Prozessanpassung oder -änderung umgesetzt werden kann	<ul style="list-style-type: none">- Eingriffe in den Prozess sind grösstenteils nicht erwünscht, zudem meistens komplexe Projektumsetzung unter laufendem Betrieb möglich- fehlende Wirtschaftlichkeit von AWN-Projekten aufgrund von zu tiefen Energiepreisen- notwendige Vorinvestitionen für Projektanklärungen und das durch den Abwärmeanbieter zu tragende Investitionsrisiko- längere Vertragsbindungen zur Abwärmelieferung (bis zu 30 Jahre) als die zu erwartende Lebensdauer der Prozesseinrichtungen (<5 Jahre)- fehlende oder zu geringe finanzielle Förderung von AWN-Projekten auf staatlicher Ebene

Tabelle 1: Auszug der Ergebnisse zur Diskussion zu fördernden Faktoren und Hemmnisse zur AWN aus Workshop 1 (weitere Details s. Dokumentation im Anhang)



Aus der Diskussion zur zweiten Fragestellung resultierte u.a. der Wunsch, den Leitfaden an verschiedene Adressaten wie Entscheidungsträger aus der Industrie, Ingenieurinnen/Ingenieure sowie Gemeinden und Behörden zu richten. Damit werde der Leitfaden vielseitig einsetzbar. Allerdings waren zu diesem Aspekt nicht alle Teilnehmer gleicher Meinung. Weiter wurde der Wunsch nach einem modular aufgebauten Leitfaden eingebracht. Zudem soll der Leitfaden kurz und bündig und mit Checklisten oder Mindmaps ausfallen.

Inhaltlich soll der Leitfaden darauf abzielen, dass mit einfachen Methoden anhand von Kennzahlen und Hilfsmitteln das Abwärmepotenzial und die Nachfrage nach Abwärme abgeschätzt werden kann. Darüber hinaus soll er hilfreiche Tipps und Vorgehensweisen für die Projektumsetzung beinhalten.

Aus Sicht der Energieversorger wäre ein Leitfaden dienlich, welcher so aufgebaut ist, dass ein Unternehmen auf einfache Art und Weise eine Selbstanalyse zum Abwärmepotenzial durchführen kann. Damit würde der Leitfaden die Funktion eines "Akquisitionstools" übernehmen.

Workshop 2

Aus den Erkenntnissen des ersten Workshops wurde ein Entwurf des Leitfadens erarbeitet, welcher am 28. November 2018 im Rahmen des zweiten Workshops zur Diskussion stand. Die Inputs des ersten Workshops wurden bei der Erarbeitung des Leitfadens wie folgt berücksichtigt:

Anforderungen aus Workshop 1	Umsetzung im Projekt
Leitfaden mit einfacher Methode	Der Leitfaden erklärt das Vorgehen zur Energieeffizienzsteigerung (Prio 1) und zur AWN (Prio 2) anhand von 5 Schritten. Es wird ein grosser Wert auf ein systematisches Vorgehen gelegt.
Leitfaden für Ingenieure, technische Fachleute	Der Leitfaden richtet sich an technische Fachleute. Merkblätter im Anhang gehen inhaltlich mehr in die Tiefe als der Leitfaden selbst. Sie informieren bei Bedarf detaillierter über einzelne Themen, die im Leitfaden erwähnt werden.
Verschiedene Adressaten (Entscheidungsträger, Energieverantwortlicher oder Ingenieur)	Im zweiten Workshop wurde der <i>Leitfaden für technische Fachleute</i> diskutiert. Es ist angedacht, neben diesem Leitfaden eine Kurzversion in Form einer <i>Broschüre für Entscheidungsträger</i> aus Industrieunternehmen zu erstellen. Die Erstellung der Broschüre erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt und ist nicht Bestandteil dieses Projekts.
Modularer Aufbau, Vorgehensweise klar beschrieben, Checklisten	Der Aufbau des Leitfadens anhand der 5 Schritte sorgt für Struktur. Es wurde versucht, die Vorgehensweise anhand von konkreten und anschaulichen Beispielen darzustellen.
Selbstanalysen und Potenzialabschätzung auf einfache Weise möglich	Die Merkblätter im Anhang unterstützen bei Selbstanalysen, Potenzialabschätzungen und in der Konzeptionsphase.



Energetische Gesamtbetrachtung	Die Kernbotschaften werden stark betont: Immer das Gesamtsystem betrachten; zuerst EEM erarbeiten und umsetzen und erst dann die AWN angehen: - Schritt 1 (Ist-Analyse Industriebetrieb) ist die Basis <i>jedes</i> Energieoptimierungs-Projekts - Schritt 2 befasst sich mit EEM - Schritte 3-5 beinhalten die AWN
--------------------------------	--

Tabelle 2: Übersicht der Anforderungen an den Leitfaden aus Workshop 1 und deren Umsetzung im Projekt

Im Workshop wurde die Struktur, der Inhalt sowie die sprachliche und grafische Aufbereitung des Entwurfs diskutiert und Verbesserungsvorschläge der Teilnehmer gesammelt. Im Allgemeinen kam der erste Entwurf des Leitfadens bei den Teilnehmenden gut bis sehr gut an und es wurden einige Themen angesprochen, die im Leitfaden zu kurz respektive nicht angesprochen wurden. Insbesondere zu folgenden Themen gab es Verbesserungsvorschläge:

- Der Leitfaden sollte allgemein etwas vereinfacht werden und spezifische Themen in den Merkblättern detaillierter beschrieben werden.
- Fördermöglichkeiten der AWN sowohl für den Investitionsbedarf als auch für Studien und Vorprojekte sollten ergänzt werden.
- Das Risikomanagement sollte detaillierter beschrieben werden. Versorgungssicherheit ist vor allem für die Kunden/Nutzer der Abwärme von grossem Interesse und muss sichergestellt sein.

Die vielseitigen Erkenntnisse und Inputs aus beiden Workshops wurden für die Erarbeitung des Leitfadens ausgewertet und entsprechend berücksichtigt.

4 Aufbau des Leitfadens

Den Kern des Leitfadens bilden 5 Schritte, mit denen ein systematisches Vorgehen für die Erarbeitung von Massnahmen zur AWN beschrieben werden. Mit Hilfe von Merkblättern im Anhang hat die Leserin bzw. der Leser die Möglichkeit, sich über spezifische Themen detaillierter zu informieren. In den einleitenden Kapiteln wird ausserdem kurz auf den Energiebedarf der Schweizer Industrie, die Zielgruppe des Leitfadens sowie Anlaufstellen und Fördermöglichkeiten zur AWN eingegangen.

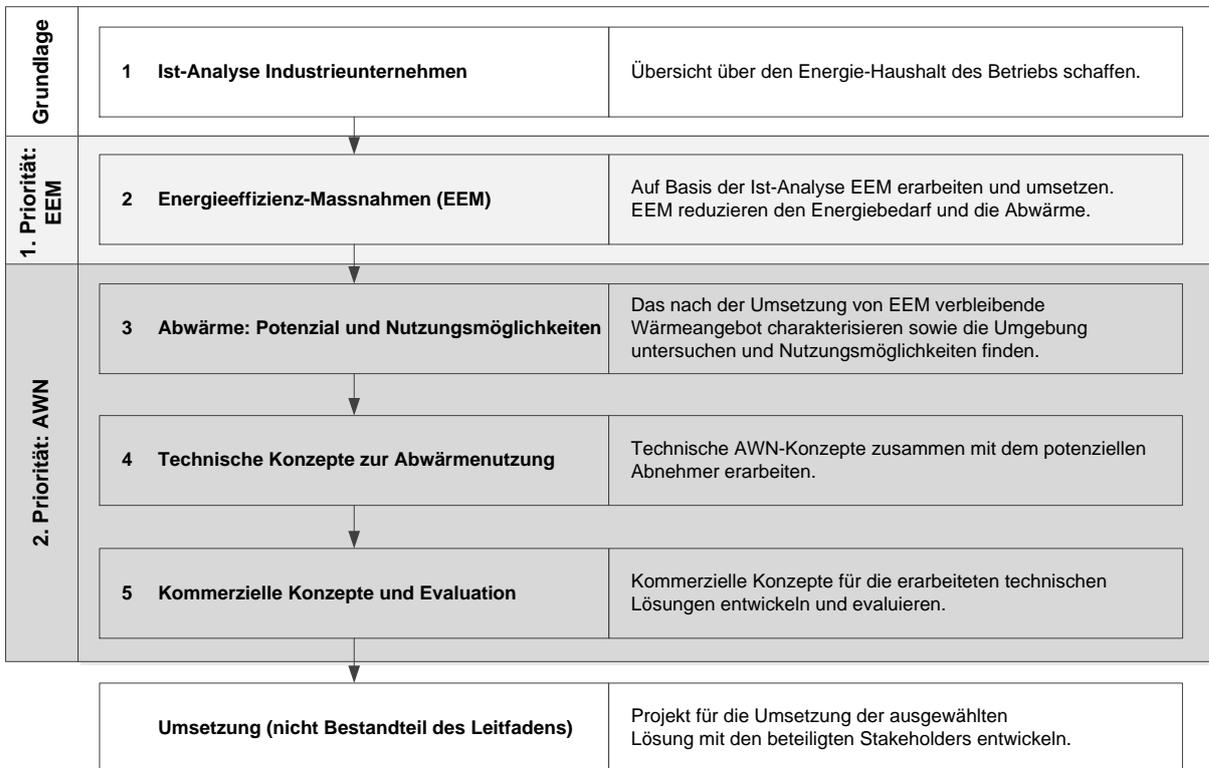


Abbildung 3: Systematisches Vorgehen zur Erarbeitung von Massnahmen zur Energieeffizienz-Steigerung und zur AWN

Schritt 1 beinhaltet die Aufnahme und Analyse des energetischen Ist-Zustands, um einen transparenten Überblick über die Energieflüsse zu schaffen. Durch die Definition geeigneter Systemgrenzen, welche die energierelevanten Produktions- und Infrastrukturanlagen enthalten, kann die Datenbeschaffung in kleinere Teilaufgaben unterteilt werden. Als Hilfestellung werden praxisnahe Methoden zur Bilanzierung und Zusammenstellung der erforderlichen Daten beschrieben.

In **Schritt 2** werden **EEM** erarbeitet und technisch/ökonomisch bewertet. Die Umsetzung der realisierbaren Massnahmen wird strategisch geplant. Mit der Massnahmen-Umsetzung wird der Energiebedarf des Unternehmens und gleichzeitig die anfallende Abwärme reduziert. **EEM haben immer erste Priorität, sie sind der AWN vorzuziehen.** Zur Identifizierung potenzieller Abwärmeströme in Industrieprozessen werden sowohl eine einfachere Methode als auch die Vorgehensweise mit der Pinch-Analyse aufgezeigt.

Die **Schritte 3 bis 5** befassen sich mit dem **Umgang mit der nicht vermeidbaren Abwärme** (z.B. in Form von Kühlwasser, Abwasser, Abluft, Abgas). Auf Basis der Charakterisierung der Abwärme und der Umgebungsanalyse werden Nutzungsmöglichkeiten abgeleitet und technische sowie kommerzielle Konzepte zur AWN erarbeitet. Im Rahmen einer umfassenden Evaluation sind die AWN-Konzepte zu bewerten.

Ein konkretes Fallbeispiel aus der Schweizer Industrie zeigt das Vorgehen auf und rundet den Leitfaden ab.



5 Schlussfolgerungen

Die Projektbearbeitung hat bestätigt, dass eine erfolgreiche industrielle AWN von vielen Faktoren abhängt. Bevor Abwärme genutzt wird, sollte der Energieverbrauch im Unternehmen so weit wie möglich durch die Umsetzung von EEM reduziert werden. Ob und wieviel der verbleibenden, unvermeidbaren Abwärme genutzt werden kann, hängt unter anderem stark von den örtlichen Gegebenheiten und den Bedürfnissen potenzieller Abnehmer ab.

Die Nutzungsmöglichkeiten der Abwärme richten sich insbesondere nach den Temperaturniveaus der Abwärme (Wärmequelle) und des Wärmebedarfs (Wärmesenke). Grundsätzlich gibt es vier unterschiedliche Nutzungsmöglichkeiten:

1. Wenn die Abwärme ein höheres Temperaturniveau als der Verwendungszweck aufweist, erfolgt die AWN mittels direkter Wärmeübertragung
2. Wenn das Temperaturniveau der Abwärme tiefer als das des Verwendungszwecks ist, erfolgt die AWN mittels Temperaturerhöhung der Abwärme, z.B. mit einer Wärmepumpe
3. Die Abwärme wird für die Stromerzeugung verwendet, z.B. mit einer ORC-Anlage
4. Die Abwärme wird für die Kälteerzeugung verwendet, z.B. mit einer Absorptionskältemaschine

Die Verwendung von direkter Wärmeübertragung stellt die Technologie mit dem geringsten technischen Aufwand dar und ist daher aus energetischen und wirtschaftlichen Gründen den anderen Nutzungsmöglichkeiten überlegen. Dies spiegelt sich auch in den untersuchten Fallbeispielen wider. Nach aktuellem Kenntnisstand gibt es in der Schweiz bis heute lediglich zwei ORC-Anlagen, mit denen aus Abwärme Strom erzeugt wird. Auch für die Nutzung zur Kälteerzeugung gibt es nur wenige Fallbeispiele.

Der Umgang mit Abwärme gehört für Industrieunternehmen nicht zum Kerngeschäft. Aus diesem Grund sollten für die Realisierung und den Betrieb der AWN immer verschiedene Geschäftsmodelle in Betracht gezogen werden:

1. Realisierung und Betrieb durch Industriebetrieb (Eigenumsetzung)
2. Realisierung und Betrieb durch Abnehmer
3. Realisierung und Betrieb durch Contractor
4. Realisierung und Betrieb durch eigens gegründete Firma
5. Realisierung und Betrieb in einem Leasing-Modell

Um ein erfolgreiches AWN-Projekt umzusetzen, sollten frühzeitig Massnahmen zur Erkennung, Analyse und Kontrolle von Risiken erarbeitet werden. Lieferverpflichtungen, Abnahmeverpflichtungen und weitere Punkte wie beispielsweise die Übernahme von Ersatzinvestitionen technischer Komponenten müssen vertraglich geregelt werden. Bei Betriebsunterbrüchen, Ausfällen oder Umstrukturierungen muss durch Redundanzsysteme die Lieferung von Wärme sichergestellt werden.



6 Weiteres Vorgehen und Ausblick

Nach Abschluss des Projekts liegen der Leitfaden und die Merkblätter als Entwurfsdokument vor. Für die Veröffentlichung müssen das Layout, die Grafiken usw. entsprechend aufbereitet werden. Weiter soll eine kurze ergänzende Broschüre für Entscheidungsträger in Industrieunternehmen und KMUs erarbeitet werden.

In weiteren Phasen, z.B. im Rahmen von Folgeprojekten, könnten folgende Aspekte bearbeitet werden:

- Der Aufwand für die Ist-Analyse und die Abschätzung des Abwärmepotenzials ist erheblich. Durch die Erarbeitung einer Empfehlung für die Datenerfassung und -auswertung in Industriebetrieben kann die Potenzialabschätzung vereinfacht und verbessert werden.
- Bei komplexeren Prozessen wird das Abwärmepotenzial mittels Pinch-Analyse ermittelt. Mit den so genannten PinCH-E-Modulen (Excel-basierte Energie-Module) können die Heiz- und Kühlbedürfnisse auf Basis von relativ wenigen Prozessdaten bestimmt werden. Es ist denkbar, spezifische E-Module für die Abwärmenutzung zu entwickeln. Der Zeitaufwand könnte reduziert und die Entscheidungsfindung erleichtert werden. Die E-Module könnten mit weiterführenden ökonomischen Modellen erweitert und in die PinCH-Software der Hochschule Luzern integriert werden.
- Mit dem Inhalt des Leitfadens könnten Werkzeuge wie beispielsweise eine interaktive Entscheidungs- und Planungshilfe in Form eines Internet-Tools entwickelt werden.
- Das Projekt behandelt die Nutzung industrieller Abwärme. Die Erkenntnisse aus dem Projekt könnten auch auf andere Abwärmequellen angewendet werden.

Im Rahmen der Energiestrategie 2050 ist es notwendig, Potenziale zur Nutzung von nicht vermeidbarer Abwärme aus Industrieprozessen zu identifizieren und zu erschliessen. Es ist zu hoffen, dass der erarbeitete Leitfaden eine gute Hilfestellung für die Praxis bietet, damit Vorhaben zur Abwärmenutzung systematisch und zielgerichtet angegangen werden.



7 Literaturverzeichnis

- [1] Der Schweizerische Bundesrat, "Energieverordnung (EnV)", 2015.
- [2] F. Brunner, P. Krummenacher, "Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode Handbuch für die Analyse von kontinuierlichen Prozessen und Batch-Prozessen", Bundesamt für Energie BFE, Sektion Industrie und Dienstleistungen, 2. Auflage, Bern, 2017.
- [3] Bundesamt für Energie BFE, "Faktenblatt Abwärme für den Umgang mit energie- und klimapolitischen Instrumenten", Bern, 2016.
- [4] R. Brunner, V. Kyburz, "Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung; Planung, Bau und Betrieb von Wärmerückgewinnungs- und Abwärmenutzungsanlagen", Impulsprogramm RAVEL, Heft 2. Bundesamt für Konjunkturfagen, Bern, 1993.
- [5] Prognos AG, Infrac AG, TEP Energy GmbH, "Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2017 nach Verwendungszwecken", Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2018.
- [6] Prognos AG, "Aktualisierung der Energieperspektiven 2035: Einsparpotentiale nach Verwendungszwecken", Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2011.
- [7] A. Sres, B. Nussbaumer, "Weissbuch Fernwärme Schweiz – VFS Strategie Langfristperspektiven für erneuerbare und energieeffiziente Nah- und Fernwärme in der Schweiz", Dr. Eicher + Pauli AG, Niederrohrdorf, 2014.
- [8] L. Miró, S. Brückner, L. F. Cabeza, "Mapping and discussing Industrial Waste Heat (IWH) potentials for different countries", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 51, S. 847-855, 2015.
- [9] M. Sulzer, S. Mennel, D. Hangartner, und J. Ködel, "Grundlagen und Erläuterungen zu Thermischen Netzen", Hochschule Luzern, Horw, 2018.



8 Anhang

- Dokumentation Workshop 1 vom 08. November 2017 (mit separater Seitennummerierung)
- Dokumentation Workshop 2 vom 28. November 2018 (mit separater Seitennummerierung)