



Schlussbericht vom 13. Dezember 2022

Low-Invest-Cost Sanierungen (LICS)

Potenziale und Limitationen von bestehenden
und neuen Lösungen für Low-Invest-Cost
Sanierungen zur Erreichung eines tiefen CO₂-
Grenzwerts bei Bestandsbauten

Datum: 13. Dezember 2022

Ort: Zürich/Bern

Subventionsgeberin

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

BFE-Vertragsnummer: SI/501969-01

Ko-Finanzierung

EWZ, 2000-Watt-Beiträge

Stadt Zürich, Amt für Hochbauten (AHB), Fachstelle Nachhaltiges Bauen

Stadt Winterthur, Fachstelle Energie, Pionierstrasse 7, 8403 Winterthur

Subventionsempfänger/innen

TEP Energy GmbH
Rotbuchstrasse 68
8037 Zürich
www.tep-energy.ch

Low-Tech Lab GmbH
Hönggerstrasse 23
8037 Zürich
www.lowtechlab.ch

Durable GmbH
Binzstrasse 12
8045 Zürich
www.studiodurable.ch

Autoren/innen

Martin Jakob, TEP Energy GmbH, martin.jakob@tep-energy.ch (Projektleitung)

Giacomo Catenazzi, TEP Energy GmbH, giacomo.catenazzi@tep-energy.ch

Jonas Müller TEP Energy GmbH, jonas.mueller@tep-energy.ch

Jonas Schmid TEP Energy GmbH, jonas.schmid@tep-energy.ch

Lia Weinberg TEP Energy GmbH, lia.weinberg@tep-energy.ch

Deborah Zulliger TEP Energy GmbH, deborah.zulliger@tep-energy.ch

Martin Ménard, Low-Tech Lab GmbH, menard@lowtechlab.ch

Mario Roost, Lemon Consult AG, roost@lemonconsult.ch

Jörg Lamster, Durable Planung und Beratung GmbH, lamster@studiodurable.ch

Thomas Wüthrich, Durable Planung und Beratung GmbH

Projektbegleitung

BFE-Projektbegleitung:

Andreas Eckmanns, BFE, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

Rolf Moser, Leiter BFE-Forschungsprogramm Gebäude und Städte (bis Ende 2020)

Nadège Vetterli, Leiterin BFE-Forschungsprogramm Gebäude und Städte, nadege.vetterli@anex.ch
(ab Anfang 2021)

Philipp Noger, Amt für Hochbauten Stadt Zürich

Stephan Peterhans, Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz (FWS)

Heinz Wiher, Fachstelle Energie Stadt Winterthur

Björn Zित्रa, Hoval AG, Feldmeilen

Verdankung

Die Autorinnen und Autoren dieses Berichts danken den finanzierenden Stellen, den Personen der Projektbegleitung sowie den Unternehmen und Gebäudeeigentümern und Verwaltungen für die Daten, die sie für das Projekt zur Verfügung gestellt haben.

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

Kurzzusammenfassung

Ausgangslage und Zielsetzung

Die Zielsetzungen der Energie- und Klimapolitik erfordern eine beschleunigte Reduktion der Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich. Hohe Investitionskosten, wie sie bei umfassenden Gebäudehüllenerneuerungen oder Gesamtanierungen oft auftreten, stellen diesbezüglich ein grosses Hemmnis dar, dies, obwohl die Massnahmen über die Lebensdauer wirtschaftlich wären.

Ziel des Projektes Low-Invest-Cost Sanierungen (LICS) ist es entsprechend, für die Gebäudeeigentümer attraktive, d.h. investitionsgünstige Ansätze für Energieeffizienz und erneuerbare Energien zu identifizieren und aufzuzeigen, wie auch mit investitionskostengünstigen Lösungen (sogenannte LICS-Lösungen) weitreichende Beiträge an die Ziele der Energiestrategie 2050 und des Klimaschutzes erzielt werden.

Vorgehen und Methodik

Das Vorgehen besteht darin, in einem ersten Schritt eine Typologie (gebäude- und energiebezogen) zu erstellen und die Datenbasis für das bestehende Technologie- und Massnahmenspektrum zu aktualisieren inkl. Formalisierung der Kostenkennwerte. Darauf aufbauend erfolgt die Konzeptentwicklung der Low-Invest-Cost-Sanierungen (Technologien und Strategien) inkl. deren techno-ökonomische Charakterisierung.

Die konzipierten LICS-Lösungen werden dann sowohl aus Eigentümersicht als auch auf Ebene des gesamtschweizerischen Gebäudeparks bewertet. Ersteres erfolgt u.a. mittels Fallstudien, wobei die LICS-Lösungen für konkrete Einzelgebäude mit konventionellen Lösungen bzgl. Investitions- und Jahreskosten, Energie und Emissionen verglichen werden. Auf Ebene Gebäudepark wird, aufgrund der zentralen Rolle der Wärmepumpen für LICS-Lösungen, zuerst das gesamtschweizerische Potenzial bzgl. Nutzung von Luft/Wasser-Wärmepumpen mit GIS-Methoden analysiert. Weiter werden mit dem Gebäudeparkmodell LICS- und andere Lösungen für verschiedene Szenarien modelliert und bewertet. Abschliessend werden Schlussfolgerungen gezogen und Handlungsempfehlungen erarbeitet.

Forschungsergebnisse

Die im LICS-Projekt erarbeitete Typologie berücksichtigt sowohl gebäudespezifische Merkmale als auch die Verfügbarkeit von leitungsgebundenen Energieträgern sowie Einschränkungen bzgl. der lokalen Nutzung von erneuerbaren Energien. Eine dezentrale erneuerbare Wärmeversorgung bei EFH ist in der Regel möglich; Einschränkungen betreffen v.a. Lösungen mit Erdwärmesonden-Wärmepumpen. Bei den MFH sind thermische Netze derzeit nur zu einem kleinen Teil vorhanden, aber dies könnte sich künftig ändern, so dass bei rund der Hälfte sowohl dezentrale als auch zentrale Lösungen in Frage kommen. Einschränkungen betreffen bei den MFH und Reihenhausüberbauungen sowohl Erdwärmesonden- als auch Luft/Wasser-Wärmepumpen (L/W-WP): bei 15% bis 20% der Gebäude auf dem Land und bei 25% bis 30% in den Städten sind beide Lösungen nicht möglich. Bei den Nicht-Wohngebäuden (NWG) sind die Einschränkungen noch grösser (wobei das Flachdach als möglicher Standort für WP nicht mit einbezogen ist). Ein Grossteil dieser Gebiete ist für die Erschliessung mit thermischen Netzen geeignet.

Die erhobenen Kostenpositionen zeigen, dass die Kosten der Nebenpositionen (z.B. Umbau Heizzentralen, Ausbau Elektroanschlüsse, Schallschutzmassnahmen etc.) oft einen bedeutenden Anteil ausmachen (bis 50%, teilweise sogar mehr). Bei L/W-WP zeigt sich auch, dass die Kosten für grössere Anlagen aufgrund der zu bewältigenden Luftvolumenströme linear zunehmen. Diese Erkenntnisse sind wichtig für die Konzeptionierung der LICS-Lösungen.

Für die Konzeption der LICS-Lösungen werden zwei Hauptmassnahmen unterschieden:

- Stadtverträgliche bivalente Luft/Wasser-Wärmepumpen: Geringere Dimensionierung der WP durch Bivalenzansatz führt zu kleinerer Leistung für Elektroanschluss, geringeren Lärmemissionen sowie reduziertem Platzbedarf und damit erhöhter Stadtverträglichkeit. Zur Deckung Spitzenlast kommt vorübergehend der bereits bestehende (fossile) Energieträger und mittel- bis langfristig ein erneuerbarer, wenn möglich lagerfähiger Energieträger zum Einsatz.
- Luft/Wasser-Wärmepumpen mit Erdreich-Spitzenlastabdeckung: Platzbedarf, Lärmemissionen und bis zu einem gewissen Mass auch die Anschlussleistung können potenziell auch durch Erdwärmesonden reduziert werden, wenn sie als Spitzenlast eingesetzt werden. Zu beachten ist, dass bei Spitzenlastzeiten die Sole-Temperatur nicht zu stark abfällt. Andere Spitzenlastsysteme sind zwar kostengünstiger, aber eine Erdwärmesonde bietet den Vorteil einer gewissen Kühlmöglichkeit im Sommer.

Weitere LICS-Lösungen haben unterstützenden Charakter und dienen dazu, die Energieeffizienz zu erhöhen und Wärmepumpenlösungen zu ermöglichen. Diese beinhalten die Senkung der Vorlauftemperatur, kostengünstige Lüftungskonzepte, Wärmerückgewinnung beim Warmwasser, Dämmung von Estrichboden und Kellerdecke etc. Mit solchen punktuellen, aber im Einzelfall zielgerichteten Massnahmen können monovalente und bei mittleren und grösseren Leistungen bivalente Luft/Wasser-Wärmepumpen zu einer umfassenden LICS-Lösung kombiniert werden.

Die elf Fallstudien zeigen, dass die Investitionskosten und die totalen Jahreskosten der LICS-Lösungen (mit Gebäudehüllenerneuerungen) in der Regel nur leicht über Lösungen mit fossilem Energieträger liegen, dies bei deutlich geringeren Emissionen. Wird auf Gebäudehüllenerneuerungen verzichtet oder auch dabei auf LICS-Lösungen gesetzt, fallen die Investitionskosten in der Regel sogar tiefer aus als bei den fossilen Lösungen. Die Emissionsreduktion ist leicht geringer als bei Lösungen mit umfassender Gebäudehüllenerneuerung, ein CO₂-Grenzwert vom 6 kg/m² kann aber immer und der Richtwert gemäss SIA 2040 teilweise eingehalten werden.

Die Bewertung auf Ebene Gebäudepark, zeigt, dass zwar ein erhebliches Potenzial für Luft/Wasser-Wärmepumpen (als Kern für eine LICS-Lösung) insbesondere bei Einfamilienhäusern und kleinen Mehrfamilienhäusern besteht. Deutliche Einschränkungen gibt es bei Nicht-Wohngebäuden und bei dichter bebauten Quartieren. Mit den Modellrechnungen wird aufgezeigt, dass eine (gesetzliche) Anforderung oder eine freiwillige Beschränkung der spezifischen CO₂-Emissionen (die im Fall einer anstehenden Heizungssanierung zur Anwendung kommt) eine hohe Wirkung entfaltet; die Emissionen können damit von heute 12 Megatonnen CO₂ pro Jahr bis 2050 auf 2 bis 3 Megatonnen gesenkt werden statt nur auf 8 Megatonnen ohne eine solche Anforderung. LICS-Lösungen spielen in der Modellbetrachtung eine gewisse, aber keine überragende Rolle (gesamtschweizerisch rund 10% Anteil).

Fazit

Durch das Projekt Low-Invest-Cost-Sanierungen konnten neuartige Lösungen für investitionskostengünstige Lösungen zur Erreichung von tiefen CO₂-Emissionen im Gebäudebereich erarbeitet werden. Die vorgeschlagenen Lösungen werden dabei aus Sicht der Eigentümer, anhand einer Fallstudie mit einer breiten Palette an konkreten Gebäuden verifiziert. Je nach Gebäudetyp können eine oder mehrere kostengünstige Lösungen empfohlen werden, dies bei moderaten Investitionskosten und einer deutlichen Senkung der Emissionen im Vergleich zu konventionellen Lösungen (basierend auf fossilen Heizsystemen), womit der Wert von 6 kg CO₂ pro m² EBF eingehalten werden kann, sowohl was die direkten als auch was die Gesamtemissionen gemäss SIA 2040 betrifft. Die vorgeschlagenen LICCS-Lösungen können beispielsweise bei schlecht gedämmten Altbauten zum Einsatz kommen. Es ist wichtig, die vorgeschlagenen Lösungen zu kommunizieren, damit Gebäudeeigentümer darauf aufmerksam werden und diese umsetzen können.

Das Potenzial für L/W-WP auf Ebene Gebäudepark hängt stark von der Lärmthematik ab und davon, ob monovalente Systeme vor Ort machbar sind oder nicht. Falls nicht, können kostengünstige bivalente Lösungen einen Beitrag zur Nutzung erneuerbarer Energie leisten. Mit Verweis auf Netto-Null-Ziele des Bundes und vieler Städte und Gemeinden sind solche bivalenten Lösungen entweder als Übergangslösungen vorzusehen (falls z.B. für eine befristete Periode bestehende fossile Energieträger für die Deckung der Spitzenlast eingesetzt werden sollen) oder es ist auch bei der Spitzenlastdeckung von erneuerbaren (wenn möglich lagerfähigen) Energien auszugehen. Diesen Aspekten ist bei der Konzeption und Umsetzung von energie- und klimapolitischen Massnahmen eine hohe Bedeutung beizumessen.

Résumé succinct

Condition de départ et objectif

Les objectifs de la politique énergétique et climatique exigent une réduction accélérée des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur du bâtiment. Les rénovations complètes de l'enveloppe des bâtiments ou les assainissements globaux engendrent des coûts d'investissement élevés qui constituent souvent un obstacle important, même si les mesures sont rentables sur toute leur durée de vie.

L'objectif du projet Low-Invest-Cost Solutions (LICS) est donc d'identifier des approches attractives pour les propriétaires de bâtiments. Cela signifie montrer et identifier des approches qui sont à la fois des solutions à faible coût d'investissement, efficaces sur le plan énergétique et issues d'énergies renouvelables, et des solutions qui peuvent contribuer de manière significative aux objectifs de la Stratégie énergétique 2050 et de la lutte contre le changement climatique.

Procédure et méthodologie

La procédure consiste, dans un premier temps, à établir une typologie (relative aux bâtiments et à l'énergie) et à actualiser la base de données pour l'éventail existant de technologies et de mesures, y compris la formalisation des valeurs caractéristiques des coûts. Sur cette base, le concept des rénovations à faible coût d'investissement (technologies et stratégies) sera développé, y compris leur caractérisation technico-économique.

Les solutions LICS conçues sont ensuite évaluées du point de vue du propriétaire et du point de vue du parc immobilier suisse. Dans le premier cas, les solutions LICS sont comparées aux solutions conventionnelles pour des bâtiments individuels en termes des coûts d'investissement annuels, d'énergie et d'émissions. Au niveau du parc immobilier, en raison du rôle central des pompes à chaleur dans les solutions LICS, le potentiel national d'utilisation des pompes à chaleur air/eau est d'abord caractérisé et analysé à l'aide de méthodes SIG. Ensuite, les solutions LICS et d'autres solutions sont modélisées dans le modèle de parc immobilier et évaluées pour différents scénarios par rapport à leurs effets sur les émissions, la consommation d'énergie et les coûts. Une évaluation finale permet de tirer des conclusions et d'élaborer des recommandations.

Résultats de la recherche

La typologie élaborée dans le cadre du projet LICS tient compte des caractéristiques spécifiques des bâtiments, de la disponibilité des énergies de réseau et des restrictions concernant l'utilisation locale des énergies renouvelables. Un approvisionnement en chaleur renouvelable décentralisé est en général possible pour les maisons individuelles; les restrictions concernent surtout les solutions avec des pompes à chaleur géothermiques. Les réseaux thermiques ne sont actuellement présents que dans une petite partie des habitations collectives, mais cela pourrait changer à l'avenir, de sorte que pour environ la moitié des habitations collectives des solutions décentralisées et centralisées sont envisageables. Les limitations concernent aussi bien les pompes à chaleur avec sonde géothermique que les pompes à chaleur air/eau (PAC A/E) : les deux solutions ne sont pas possibles pour 15% à 20% des bâtiments en milieu rural et pour 25% à 30% en milieu urbain. Pour les bâtiments non

résidentiels (BNR), les restrictions sont encore plus importantes (sans évaluer si le toit plat est un emplacement possible pour la PAC).

Les coûts relevés montrent que les coûts pour les installations subordonnées (p. ex. raccordements électriques, mesures d'insonorisation, etc.) représentent souvent une partie importante des coûts (jusqu'à 50%, parfois même plus). Pour les PAC A/E, il apparaît également que les coûts des grandes installations augmentent de manière linéaire en raison des débits d'air à maîtriser. Ces conclusions sont importantes pour la conception des solutions LICS.

Pour la conception des solutions LICS, on distingue deux mesures principales :

- Pompes à chaleur air/eau bivalentes compatibles avec une implantation en ville : un dimensionnement plus faible de la PAC grâce à l'approche bivalente permet de réduire la puissance pour le raccordement électrique, les émissions sonores et l'encombrement et permet donc d'augmenter la compatibilité avec la ville. Pour couvrir les pointes de charge, on utilise temporairement la source d'énergie (fossile) déjà existante et, à moyen ou long terme, une source d'énergie renouvelable, si possible stockable.
- Pompes à chaleur air/eau avec couverture de la pointe de consommation électrique par le sol : l'encombrement, les émissions sonores et, dans une certaine mesure, la puissance connectée peuvent être potentiellement réduits par des sondes géothermiques lorsqu'elles sont utilisées durant les pointes de consommation électrique. Il faut veiller à ce que la température de la saumure ne baisse pas trop aux pics de consommation. D'autres systèmes pour réduire les pointes de consommation électrique sont moins chers, mais une sonde géothermique offre l'avantage de pouvoir couvrir une part des besoins de refroidissement en été, si toutefois des systèmes de distribution du froid sont disponibles.

Les autres solutions LICS sont des mesures d'optimisation énergétique ou d'assainissement de l'enveloppe, qui comprennent la réduction de la température de départ, des concepts de ventilation peu coûteux, la récupération de chaleur pour l'eau chaude, l'isolation du sol des combles et du plafond de la cave, etc. Ces mesures ponctuelles, mais ciblées dans certains cas, permettent de combiner des pompes à chaleur air/eau monovalentes et bivalentes pour les puissances moyennes et élevées en une solution LICS complète.

Les onze études de cas montrent que les coûts d'investissement et les coûts annuels totaux des solutions LICS (avec rénovation de l'enveloppe du bâtiment) ne sont en général que légèrement supérieurs à ceux des solutions utilisant une source d'énergie fossile, en produisant des émissions nettement plus faibles. En omettant les rénovations de l'enveloppe des bâtiments, les coûts d'investissement de solution LICS sont en général même inférieurs à ceux des solutions fossiles. La réduction des émissions en de réalisation des solution LICS est légèrement inférieure à celle des solutions impliquant une rénovation complète de l'enveloppe du bâtiment, mais la valeur limite de 6 kg/m² de CO₂ peut toujours être respectée et la valeur indicative selon SIA 2040 partiellement.

L'évaluation au niveau du parc immobilier montre qu'il existe un potentiel considérable pour les pompes à chaleur air/eau (comme noyau d'une solution LICS), en particulier pour les maisons individuelles et les petits immeubles collectifs. Il existe des restrictions importantes pour les bâtiments non résidentiels et les quartiers plus densément construits. Les modèles de calcul montrent que, en cas de rénovation du chauffage, des limitations des émissions

spécifiques de CO₂, soit par une exigence légale ou une restriction volontaire, ont un effet important : les émissions peuvent ainsi être réduites de 12 mégatonnes de nos jours à 2 ou 3 mégatonnes en 2050, au lieu de 8 mégatonnes en 2050 sans une telle exigence. Les solutions LICS jouent un certain rôle dans le modèle, mais pas un rôle prépondérant (environ 10% pour l'ensemble de la Suisse).

Conclusion

Le projet Low-Invest-Cost-Sanierungen a permis d'élaborer des solutions inédites à faible coût d'investissement afin d'atteindre de faibles émissions de CO₂ dans le secteur du bâtiment. Les solutions proposées ont été vérifiées du point de vue des propriétaires, à l'aide d'une étude de cas portant sur un large éventail de bâtiments. Selon le type de bâtiment, une ou plusieurs solutions économiques peuvent être envisagées, avec des coûts d'investissement modérés et une réduction significative des émissions par rapport aux solutions conventionnelles (basées sur des systèmes de chauffage fossiles), ce qui permet de respecter la valeur de 6 kg de CO₂ par m² de surface de référence énergétique, qui concerne les émissions directes et les émissions totales selon la norme SIA 2040. Les solutions LICS proposées peuvent par exemple être appliquées dans les bâtiments anciens mal isolés. Il est important de communiquer les solutions proposées afin que les propriétaires de bâtiments y soient attentifs et puissent les mettre en œuvre.

Le potentiel des PAC au niveau du parc immobilier dépend fortement de la thématique du bruit et de la in-/faisabilité des systèmes monovalents sur place. Si ce n'est pas le cas, des solutions bivalentes peu coûteuses peuvent contribuer à l'utilisation d'énergie renouvelable. En référence aux objectifs zéro net de la Confédération et de nombreuses villes et communes, de telles solutions bivalentes doivent être prévues soit comme solutions transitoires (par exemple s'il faudra utiliser les sources d'énergie fossiles existantes pour couvrir la charge de pointe pendant une période limitée), soit s'il faut également recourir à des énergies renouvelables (si possible stockables) pour la couverture de la charge pointe. Il convient d'accorder une grande importance à cet aspect lors de la conception et de la mise en œuvre des mesures de politique énergétique et climatique.

Short Summary

Introduction and objectives

The objectives of the current energy and climate policies require an accelerated reduction of greenhouse gas emissions in the building sector. High investment costs, often seen in the case of comprehensive building envelope retrofits or overall refurbishments, are a major obstacle in this respect, even though the measures would be cost-effective over their lifetime.

The goal of the Low-Invest-Cost Renovations (LICS) project is therefore to identify attractive, i.e., low-investment approaches for energy efficiency and renewable energies for building owners and to demonstrate how low-investment solutions (so-called LICS solutions) can also make far-reaching contributions to the goals of the Energy Strategy 2050 and climate protection.

Procedure and methodology

In a first step, a typology is created (building and energy-related) and the existing range of technologies and measures is updated, including formalising the cost parameters. Based on this, the concept development of the low-investment cost renovations (technologies and strategies) including their techno-economic characterisation is carried out.

The designed LICS solutions are then evaluated from both the owner's and the entire Swiss building stock perspective. The former is done by means of case studies, whereby the LICS solutions for specific individual buildings are compared with conventional solutions in terms of investment, annual costs, energy and emissions. On the building stock level, due to the central role of heat pumps for LICS solutions, the potential for the use of air-to-water heat pumps throughout Switzerland is first analysed using GIS methods. Furthermore, LICS and other solutions are modelled and evaluated for different scenarios using the building stock model. Finally, conclusions are drawn and recommendations for actions are developed.

Research results

The developed typology takes into account both building-specific features and the availability of grid-bound energy sources as well as restrictions regarding the local use of renewable energies and shows the most important building types that are considered in the case studies. A decentralised renewable heat supply for single-family homes is generally possible; restrictions mainly affect solutions with ground source heat pumps. In the case of MFH, thermal networks are currently only available to a limited extent, but this could change in the future, so that both decentralised and centralised solutions are possible for around half of them. Restrictions apply to both borehole heat exchangers and air-to-water heat pumps in the case of MFH: for 15% to 20% of buildings in the countryside and 25% to 30% of buildings in cities, both solutions are not possible. For non-residential buildings (NRB), the restrictions are even greater (not including the flat roof as a possible location for WP).

The collected cost data show that ancillary items (e.g., electrical connections, sound insulation measures, etc.) often account for a significant proportion of the costs (up to 50%, sometimes even more). In the case of air-to-water heat pumps, it is also evident that the costs

for larger systems increase linearly due to the air volume flows that must be processed. These findings are important for the subsequent design of LICS solutions.

Two main measures are distinguished for the conceptual design of LICS solutions:

- City-compatible bivalent air/water heat pumps: a bivalent approach leads to smaller HP power and thus a lower power for electrical connection, lower noise emissions as well as reduced space requirements and thus increased city compatibility. To cover peak loads, the existing (fossil) energy source is used for an intermediate period, and, in the medium to long term, a renewable energy source is used that should ideally be able to be stored.
- Air-to-water heat pumps with ground peak load coverage: Space requirements, noise emissions and, to a certain extent, the connected load can potentially also be reduced by ground heat probes if they are used as a peak load. It is important to ensure that the brine temperature does not drop too much during peak load periods. Other peak load systems are less expensive, but a geothermal probe offers the advantage of some cooling in summer if cooling systems are available.

Further LICS solutions have an ancillary and supporting character to increase the energy efficiency and to facilitate the use of heat pumps. They include lowering the temperature of the heating circulation system, cost-efficient ventilation concepts, heat recovery for hot water, insulation of the attic floor and basement ceiling, etc. With such selective, but in individual cases targeted measures, monovalent and, in the case of medium and large outputs, bivalent air/water heat pumps can be combined to form a comprehensive LICS solution.

The eleven case studies show that the investment costs and the total annual costs of the LICS solutions (with building envelope renovations) are generally only slightly higher than solutions with fossil energy sources, however, show significantly lower emissions. If the building envelope renovations are omitted or LICS solutions are used, the investment costs are generally even lower than for fossil solutions. The emission reduction is slightly lower than for solutions with comprehensive building envelope renovation, but a CO₂ limit value of 6 kg/m² can always be met and the guideline value according to SIA 2040 can be partially met.

The assessment on the building stock level shows that there is considerable potential for air-to-water heat pumps (as the core of a LICS solution), especially in single-family houses and small apartment buildings. There are clear limitations for non-residential buildings and for more densely built neighbourhoods. The model calculations show that legal requirements or voluntary restrictions on specific CO₂ emissions in the case of a pending heating system renovation have a high effect; the emissions can be reduced from 12 Mt today to 2 to 3 Mt by 2050 instead of only 8 Mt without such requirements. LICS solutions play a certain, but not an overwhelming role in the model analysis (around 10% share for Switzerland as a whole).

Conclusion

With the Low-Invest-Cost Renovations project new solutions for low-investment measures to achieve low CO₂ emissions in the building sector were developed. The proposed solutions were verified from the perspective of the owners, using a case study with a wide range of buildings. Depending on the type of building, one or more cost-effective solutions can be recommended, with moderate investment costs and a significant reduction of emissions compared to conventional solutions (based on fossil heating systems), which means that the

limit value of 6 kg CO₂ per m² can be complied with, both in terms of direct and total emissions according to SIA 2040. The proposed LICS solutions can be used, for example, in poorly insulated old buildings. It is important to communicate the proposed solutions so that building owners become aware of them and can implement them.

The potential for air-to-water heat pumps on the building stock level depend strongly on the noise emission issue and whether monovalent systems are feasible on site or not. If not, cost-effective bivalent solutions can contribute to the use of renewable energy. In regard to the net-zero targets of the federal government and many cities and municipalities, such bivalent solutions should either be envisaged as transitional solutions (if, for example, existing fossil energy sources are to be used to cover the peak load for a limited period of time) or renewable (if possible storable) energies should also be assumed to cover the peak load. This aspect is of great importance in the conception and implementation of energy and climate policy measures.

Take-home messages

- Tiefe THG-Emissionen mit LICS sind möglich: LICS-Lösungen stellen sowohl günstige Lösungen in Bezug auf Investitions- und Totalkosten als auch in Bezug auf die Treibhausgas-Emissionen dar. Mit sämtlichen konzipierten LICS-Lösungen kann der CO₂-Grenzwert von 6 kg CO₂ pro m² Energiebezugsfläche eingehalten werden.
- Fokus Heizsystem (Bivalenz), unterstützt durch Nachfragemassnahmen: Der Fokus der LICS-Lösungen liegt bei bivalenten Heizsystemen wie stadtverträgliche Luft/Wasser Wärmepumpen. Nachfrageseitige Massnahmen wie Senkung der Vorlauftemperatur, kostengünstigen Lüftungskonzepte oder Wärmerückgewinnung beim Warmwasser sind als unterstützenden Massnahmen zu empfehlen.
- Hohe Bedeutung im urbanen Umfeld (v.a. MFH): Hier kommen die Vorteile der bivalenten Systeme (Leistungs- und Lärmreduktion, verbesserte Platzverhältnisse) besonders zum Tragen und sind oft die einzige Möglichkeit, erneuerbare Wärmeerzeugung zu installieren.
- Anforderung spezifische CO₂-Emissionen pro Quadratmeter (z.B. 6 kg/m²): Anforderungen an den spezifischen Verbrauch stellen in der kurzen und mittleren Frist ein wirksames Instrument zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors dar. Anhand des Grenzwertes von 6 kg CO₂ pro m² Energiebezugsfläche können die Emissionen von heute 12 Mt auf 2-3 Mt bis 2050 gesenkt werden (ohne Anforderung: 8 Mt im Jahr 2050). Mittel- bis langfristig sind die Anforderungen so zu verschärfen, dass auch die Spitzelast durch erneuerbare Energien gedeckt wird, um die direkten und indirekten Emissionen auf (beinahe) null zu senken.

Message à emporter

- De faibles émissions de GES sont possibles avec LICS : les solutions LICS représentent des solutions avantageuses en termes de coûts d'investissement et de coûts totaux, mais aussi en termes d'émissions de GES. Toutes les solutions LICS conçues permettent de respecter la valeur limite de 6 kg de CO₂ par m² de surface de référence énergétique.
- Focalisation sur le système de chauffage (bivalence), soutenue par des mesures d'optimisation énergétique : Les solutions LICS se concentrent sur les systèmes de chauffage bivalents tels que les pompes à chaleur air/eau qui sont compatibles en milieu urbain. Des mesures d'optimisation énergétique, telles que la réduction de la température de départ, des concepts d'aération peu coûteux ou la récupération de chaleur pour l'eau chaude, sont recommandées en tant que mesures de soutien.
- De grande importance dans les environnements urbains (surtout les immeubles collectifs) : les avantages des systèmes bivalents (réduction de la puissance, du bruit et de la place nécessaire) sont ici particulièrement importants et constituent souvent la seule possibilité d'installer une production de chaleur renouvelable.
- Concernant l'exigence d'émissions spécifiques de CO₂ par mètre carré (par ex. 6 kg/m²) : À court et moyen terme les exigences en matière de consommation spécifique constituent un outil efficace pour décarboniser le secteur du bâtiment. La valeur limite de

6 kg de CO₂ par m² de surface de référence énergétique permet de réduire les émissions de 12 Mt aujourd'hui à 2-3 Mt en 2050 (sans exigence : 8 Mt en 2050). À moyen et long terme, les exigences doivent être renforcées de manière à ce que les pointes de la demande soient couvertes par des énergies renouvelables, afin de réduire les émissions directes et indirectes à (presque) zéro.

Main findings

- Low GHG emissions are possible with LICS: LICS solutions represent favourable solutions in terms of investment and total costs as well as in terms of greenhouse gas emissions. The CO₂ limit value of 6 kg CO₂ per m² of energy reference area can be met with all designed LICS solutions.
- Focus on heating system (bivalence), supported by demand-side measures: The focus of the LICS solutions is on bivalent heating systems such as city-compatible air/water heat pumps. Demand-side measures such as reducing the supply temperature, cost-effective ventilation concepts or heat recovery for hot water are recommended as supporting measures.
- High importance in urban environments (especially in multi-storey buildings): Here, the advantages of bivalent systems (power and noise reduction and the reduction of the needed space) are particularly effective and are often the only possibility to install renewable heat generation.
- Requirements for specific CO₂ emissions per square metre (e.g., 6 kg/m²): In the short and medium term, specific consumption requirements are an effective tool to decarbonise the building sector. Based on the limit value of 6 kg CO₂ per m² of energy reference area, emissions can be reduced from 12 Mt today to 2-3 Mt by 2050 (without requirement: 8 Mt in 2050). In the long term, the requirements must be tightened so that the peak load is also covered by renewable energies in order to reduce direct and indirect emissions to (almost) zero.

Inhalt

Kurzzusammenfassung	3
Résumé succinct	6
Short Summary	9
Take-home messages	12
Message à emporter	12
Main findings	13
Abkürzungsverzeichnis	18
Zusammenfassung	20
1 Einleitung	28
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	28
1.2 Motivation des Projektes	29
1.3 Projektziele	30
1.4 Untersuchungsgegenstand	30
1.4.1 Gebäudetypen	31
1.4.2 Massnahmenspektrum	31
2 Vorgehen und Methode	36
2.1 Methodisches Vorgehen in der Übersicht	36
2.2 Basisdefinitionen und Beurteilungskriterien	37
2.2.1 Ambitionierte Klima- und Energieziele	37
2.2.2 Definition Low Invest Cost	40
2.2.3 Kriterien zur Beurteilung der Low Invest Cost Solutions	41
2.3 Energie- und Leistungsberechnungen	43
2.3.1 Nutzenergie inkl. Berücksichtigung des Energy Performance Gap	44
2.3.2 Nutzungsgrade Wärmeerzeuger zur Umrechnung in Endenergie	45
2.3.3 Leistungsberechnung	46
2.4 Wirtschaftlichkeitsrechnungen	49
2.4.1 Methodik: LZK, INSPIRE-Tool	49
2.4.2 Annahmen zur Berechnung der Kapitalkosten	49
2.4.3 Annahmen Endenergiepreise	50
2.5 Fazit: zu erhebende Daten und Gebäudeparameter	51

3	Gebäude- und energiebezogene Standorttypologie	54
3.1	Gebäudetypologie	54
3.2	Energiebezogene Standorttypologie	57
3.3	Synthese der Gebäude- und energiebezogenen Standorttypologie	59
4	Aktualisierung und Kontextualisierung von Kostenkennwerten	62
4.1	Kostenkennwerte Heizanlagen	62
4.1.1	Herleitung der Kostenkennwerte	62
4.1.2	Preisstand	63
4.1.3	Erläuterungen zu den Kostenstufen	63
4.1.4	Vergleich mit anderen Quellen mit Kostenkennwerten	66
4.1.5	Bivalente Wärmeerzeugung	66
4.2	Kostenkennwerte Gebäudehüllenmassnahmen	69
5	Konzeptentwicklung von neuen technischen Lösungen für Low-Invest-Cost-Sanierungen (LICS)	72
5.1	Stadtverträgliche bivalente Luft/Wasser-Wärmepumpe	72
5.1.1	Ausgangslage	72
5.1.2	Bivalenzregelung	75
5.1.3	Aufstellungsort	78
5.1.4	Kostenkennwerte	79
5.1.5	Energiekosten und Umweltkennwerte	82
5.1.6	Wirtschaftlichkeitsvergleich	84
5.2	Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Erdreich-Spitzenlastdeckung	85
5.3	Senkung der Vorlauftemperatur durch wärmeabgabeseitige Massnahmen	87
5.3.1	Nachrüstung mit Niedertemperatur-Wärmeabgabesystemen	87
5.3.2	Weitere Massnahmen	91
5.4	Kostengünstige Lüftungskonzepte	92
5.4.1	Passive Fensterlüfter	92
5.4.2	Abluftanlagen mit und ohne Abluft-Wärmepumpe	94
5.5	Wärmerückgewinnung Warmwasser	95
6	Bewertung aus Eigentümersicht und gemäss SIA-Effizienzpfad	97
6.1	Objektakquise	97

6.2	Massnahmenkombinationen	99
6.3	Exemplarische Darstellung der Fallstudien	99
6.3.1	Beschreibung Gebäude Ist-Zustand	99
6.3.2	Beschreibung Strategien	101
6.3.3	Ergebnisse mit INSPIRE Tool	102
6.4	Ergebnisse zu den Fallstudien in der Übersicht	103
6.4.1	Anwendung der Strategien S1 bis S5 auf die 11 Fallstudien	103
6.4.2	Ergebnisse aus den Fallstudien	106
6.5	Sensitivitätsanalyse	110
6.6	Fazit und Erkenntnisse aus den Fallstudien	111
7	Gebäudeparkbetrachtung	112
7.1	Parameterstudie zur Bestimmung der Potenziale und Restriktionen von Luft/Wasser-Wärmepumpen	112
7.1.1	Methodisches Vorgehen in der Übersicht	113
7.1.2	Methodik und Berechnungsgrundlagen und -annahmen im Einzelnen	114
7.1.3	Strukturierung des Gebäudeparks nach Gebäudetypen und nach Lärmschutzaspekten	118
7.1.4	Ergebnisse der Parameterstudie	119
7.1.5	Fazit	123
7.2	Auswirkungen verschiedener Einflussgrößen auf Ergebnisindikatoren auf der Gebäudeparkebene	124
7.2.1	Fragestellungen und Untersuchungsansatz	124
7.2.2	Wichtige Berechnungsgrundlagen, Prämissen und Annahmen	125
7.2.3	Nutzenergie Raumwärme und Warmwasser	128
7.2.4	Entwicklung der Heizsysteme	130
7.2.5	Entwicklung auf Ebene Endenergie	134
7.2.6	Entwicklung der direkten CO ₂ -Emissionen	138
7.2.7	Entwicklung der THG-Emissionen	139
7.2.8	Entwicklung der Investitionskosten	140
7.2.9	Jährliche Energiekosten	142
7.3	Fazit der Betrachtung auf Gebäudeparkebene	143

8	Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	144
8.1	Schlussfolgerungen	144
8.2	Handlungsempfehlungen	146
9	Verbreitung und Anwendung der Forschungsergebnisse	152
9.1	Nationale und internationale Zusammenarbeit	152
9.1.1	Nationale Zusammenarbeit	152
9.1.2	Internationale Zusammenarbeit	153
9.2	Kommunikation und Publikationen	153
10	Literaturverzeichnis	154
11	Anhang	158
11.1	Anhang 1: Detailergebnisse zu Kostenkennwerten	158
11.2	Anhang 2.1: Detailergebnisse Kap. 7.1	160
11.2.1	Statistische Modell zur Schätzung der Eignungswahrscheinlichkeit für eine Luft/Wasser-WP	160
11.2.2	Strukturierung des Gebäudeparks nach Gebäudetypen und Lärmschutzaspekten	162
11.2.3	Auswertung WP-Eignung nach Empfindlichkeitsstufen	163
11.3	Anhang 2.2: Detailergebnisse Kap. 7.2	164
	Entwicklung der Heizsysteme	165
	Entwicklung auf Ebene Primärenergie	169

Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensional
AP	Arbeitspaket
AWEL	Amt für Wasser, Energie und Luft
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFE	Bundesamt für Energie
BFS	Bundesamt für Statistik
BKP	Baukostenplan
BP	Bauperiode
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CRB	Centre suisse d'études pour la rationalisation de la construction (ehemals Centre Suisse d'études pour la Rationalisation du Bâtiment)
EAK	Elementartenkatalog
EBF	Energiebezugsfläche
EFH	Einfamilienhaus
EGID	Eidgenössische Gebäude-Identifikator
EPG	Energy performance gap
ES	Empfindlichkeitsstufe
GA	Gebäudeautomation
GEAK	Gebäudeenergieausweis der Kantone
GIS	Geographisches Informationssystem
GPM	Gebäudeparkmodell
GT	Gebäudetyp
GWR	Gebäude- und Wohnungsregister
HLKSE	Heizung, Lüftung, Kälte, Sanitär, Elektro
HP	Heat pump
IEA	Internationale Energieagentur
JAZ	Jahresarbeitszahl
JNG	Jahresnutzungsgrad
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
KVA	Kehrichtverbrennungsanlagen
LICS	Low-Invest-Cost Sanierungen

LZK	Lebenszykluskosten
LTL	Low Tech Lab
L/W	Luft/Wasser
LZK	Lebenszykluskosten
MFH	Mehrfamilienhaus
ML	Modelllauf
Mt	Megatonne (1 Mio. t)
MuKE	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
MWST	Mehrwertsteuer
NE	Nutzenergie
NWG	Nicht-Wohngebäude
PE	Primärenergie
PEF	Primärenergiefaktor
PJ	Petajoule (10^9 MJ bzw. 10^{15} J)
PtG	Power to Gas
REA	Räumliche Energieanalysen
RW	Raumwärme
SAP	Strategische Ansatzpunkte (für die Reduktion von CO ₂ -Emissionen)
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SN	Schweizer Norm
S/W	Sole/Wasser
TEP	Technology, Economics, Policy
THG	Treibhausgas
WG	Wohngebäude
WIS	Wärmeinitiative Schweiz
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser
W/W	Wasser/Wasser

Zusammenfassung

Ausgangslage

Die Zielsetzungen der Energie- und Klimapolitik erfordern auch im Gebäudebereich angepasste Strategien, um die Reduktion der Treibhausgasemissionen von Gebäuden zu beschleunigen. Die Wärmeerzeugung weist im Vergleich zu umfassenden Massnahmen an der Gebäudehülle eine vergleichbare oder gar bessere Wirtschaftlichkeit und vor allem einen geringeren Investitions- und Finanzbedarf auf. Sie sieht sich auch deswegen geringeren Realisierungshemmnissen gegenüber und verspricht schnellere Fortschritte bei der Reduktion der Treibhausgasemissionen (2 bis 3% pro Jahr statt weniger als 1% pro Jahr).

Hohe Investitionskosten, wie sie bei umfassenden Gebäudehüllenerneuerungen oder Gesamtsanierungen oft auftreten, stellen aus energie- und klimapolitischer Sicht oft ein grosses Hemmnis dar, dies, obwohl die Massnahmen über die Lebensdauer wirtschaftlich wären. Ziel des Projektes ist es entsprechend, für die Gebäudeeigentümer attraktive, d.h. investitions-günstige Ansätze für Energieeffizienz und erneuerbare Energien zu identifizieren und aufzuzeigen, wie auch mit investitionskostengünstigen Lösungen (sogenannte Low-Invest-Cost-Sanierungen, LICs) weitreichende Beiträge an die Ziele der Energiestrategie 2050 und des Klimaschutzes erzielt werden können.

Vorgehen

Das Vorgehen besteht darin, die Datenbasis für das bestehende Technologie- und Massnahmenspektrum zu aktualisieren, dieses in einen nutzungsplanerischen und städtebaulichen Kontext zu stellen, konzeptionell weiterzuentwickeln und auf der Ebene des einzelnen Gebäudes und des gesamten Gebäudeparks zu bewerten. Zu diesem Zweck und zur Verfolgung der obengenannten Zielsetzung werden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

1. Definition des methodischen Rahmens, der Systemgrenzen und Rahmenparameter sowie des Untersuchungsgegenstands (inkl. der zu bearbeitenden Gebäudetypen).
2. Aktualisierung und Kontextualisierung der techno-ökonomischen Datenbasis von bestehenden Technologieangeboten und Herangehensweisen. Formalisierung der Kennwerte gemäss transparenter und anerkannter Methodik.
3. Konzeptentwicklung von neuen technischen Low-Invest-Cost-Sanierungslösungen (Technologien und Strategien) inkl. techno-ökonomische Charakterisierung, die ambitionierte Grenzwerte von direkten CO₂- und Treibhausgasemissionen sowie Primärenergie gemäss SIA-Effizienzpfad erreichen.
4. Bewertung aus Eigentümersicht: Darstellung der direkten CO₂-Emissionen, der Treibhausgasemissionen, der End- und Primärenergie sowie der Investitions- und Jahreskosten, generisch und spezifisch für konkrete Einzelgebäude, die verschiedene Gebäudetypen, Bauperioden und Standorttypen abdecken.
5. Bewertung auf Ebene Gebäudepark: Darstellen der Auswirkungen LICs-Lösungen auf CO₂-Emissionen, Energieverbrauch sowie auf Investitions- und Leistungsbedarf des gesamten Schweizer Gebäudeparks bzw. der leitungsgebundenen Energieträger.
6. Erarbeitung von Handlungsempfehlungen und Kommunikation der Ergebnisse

Typologisierung

Die erstellte Typologie, die sowohl gebäudespezifische Merkmale (Gebäudetypologie) als auch Verfügbarkeit von leitungsgebunden Energieträgern (energiebezogene Standorttypologie) berücksichtigt, zeigt die wichtigsten Gebäudetypen auf, welche für die Fallstudien berücksichtigt werden.

Wohngebäude (Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser) sowie Bürogebäude, vorwiegend aus älteren Bauperioden vor 1980, mit einem schlechten bis mittleren Sanierungsgrad (Energieeffizienz). Bei einem grossen Teil dieser Gebäude wurden zwar die Fenster in den letzten zwanzig bis dreissig Jahren erneuert, aber die übrigen Bauteile weisen nach wie vor mehrheitlich nicht – energetisch erneuerte Anteile von 50% bis 70% auf, bei der Kellerdecke bis 80%. Noch fast gar nicht sind die Gebäude der 1980er Jahre erneuert (selbst die Fenster kaum), was sowohl durch ihr Alter als ihre vergleichsweise bessere Energieeffizienz zu erklären ist. Einfamilienhäuser (EFH) insgesamt und Mehrfamilienhäuser (MFH) der Vorkriegsperiode und der 1980er-Jahre weisen grossmehrheitlich Steildächer auf, während die übrigen MFH sowie Büro- und viele andere Nicht-Wohngebäudetypen meistens ein Flachdach haben.

Die energiebezogene Standorttypologie zeigt, dass eine dezentrale erneuerbare Wärmeversorgung bei EFH in der Regel möglich ist; Einschränkungen betreffen v.a. Lösungen mit Erdsondenwärmepumpen (S/W-WP). Thermische Netze sind in EFH-Quartieren in der Regel nicht verfügbar und dies ist aus Gründen der Kosteneffizienz auch künftig nicht zu erwarten. Bei den MFH sind thermische Netze derzeit ebenfalls nur zu einem kleinen Teil vorhanden, aber dies könnte sich künftig ändern, so dass bei rund der Hälfte sowohl dezentrale als auch zentrale Lösungen in Frage kommen. Einschränkungen betreffen sowohl Erdwärmesonden als auch Luft/Wasser-Wärmepumpen (L/W-WP): bei 15% bis 20%, in den Städten 25% bis 30%, der Gebäude sind beide Lösungen nicht möglich. Bei den Nicht-Wohngebäuden sind die Einschränkungen noch grösser, es sei denn, das Flachdach wird als möglicher Standort für WP mit einbezogen. Hierbei wäre zu prüfen, inwiefern das Umplatzieren der Technikzentrale vom Untergeschoss in den Dachbereich eine Herausforderung darstellt. Ebenfalls hilfreich ist in solchen Situationen ein thermisches Netz, welches eine weitreichende investitions-günstige Versorgung von Mehrfamilienhäusern und Nichtwohngebäuden mit erneuerbaren Energien ermöglichen würde.

Kostenkennwerte

Sowohl für Heizanlagen wie auch für Gebäudehüllenmassnahmen (differenziert nach Dämmstärken) werden Kostenkennwerte eruiert, bei den Heizanlagen sowohl für monovalente als auch für bivalente Systeme. Die Kostenkennwerte werden für verschiedene Bau- und Gebäudetechnikelemente in verschiedene Kostenpositionen (Kostenpunkte) strukturiert, soweit wie möglich gemäss der Kostenplanungssystematik des CRB (Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung). Festzuhalten ist, dass bei den meisten Elementen die Kosten der Nebenpositionen einen bedeutenden Anteil ausmachen können (bis 50%, teilweise sogar mehr). Dies betrifft beispielsweise Kosten für Elektroanschlüsse, Schallschutzmassnahmen sowie Baumeister- und Umgebungsarbeiten. Solche Nebenpositionen sind vor allem bei einem Wechsel von einem bestehenden zu einem neuen Energieträger von Relevanz, sowohl in punkto Höhe und als auch in punkto Häufigkeit. Auch bei der energetischen Erneuerung der Gebäudehülle können Nebenpositionen von grosser Bedeutung sein.

LICS-Lösungen

Im Rahmen des Projekts werden folgende technische Lösungen mit potenziell niedrigen Investitionskosten und entsprechend hohen Marktchancen beim Heizungsersatz untersucht und konzeptionell weiterentwickelt, wobei zwischen Hauptmassnahmen und unterstützenden Massnahmen unterschieden wird. Konzeptionell sollen erstere einen Hauptteil der Emissionsreduktion leisten, während letztere die Hauptmassnahmen ermöglichen oder effizienter machen sollen, namentlich durch eine Steigerung der Energieeffizienz und eine Senkung der Vorlauftemperaturen. Ein weiterer konzeptioneller Ansatz sind bivalente Ansätze, die v.a. von Interesse sind, um den Leistungsbedarf bzw. den Energieanteil des einen bzw. des anderen Energieträgers zu reduzieren. Für die Ermittlung von Kostenkennwerten kommt eine eigens entwickelt Methodik zur Anwendung. Im Ergebnis sind bivalente Systeme ab einem Leistungsbedarf von 30 bis 40 kW unter Umständen günstiger als monovalente, wobei z.T. auch kleinere Leistungen in Frage kommen, wenn diese als Kompaktgeräte angeboten und installiert werden können (in der Praxis werden bivalente Systeme jedoch bis jetzt eher für grössere Leistungen ab 100 kW eingesetzt). Vertieft untersucht werden die folgenden LICS-Hauptmassnahmen:

- **Stadtverträgliche bivalente Luft/Wasser-Wärmepumpe:** durch den Bivalenzansatz kann die Leistung der WP deutlich geringer dimensioniert werden, wodurch die Leistung für den Elektroanschluss, die Lärmemissionen sowie der Platzbedarf deutlich reduziert werden. Damit erhöht sich die Stadtverträglichkeit der WP, v.a. wenn die bestehende Gas- oder Ölversorgung als Spitzenlast eingesetzt wird. Wenn fossile Varianten dieser Energieträger zur Anwendung kommen, ist darauf zu achten, dass deren energetische Anteil gering gehalten wird (10% bis 20%), um die ambitionierten CO₂-Grenzwerte einhalten zu können. Investitionsseitig ist ab etwa 30 bis 40 kW mit Einsparungen gegenüber monovalenten Anlagen zu rechnen (typischerweise mit rund 50 CHF/m²), so dass auch die Jahreskosten der bivalenten Lösungen tiefer liegen (um ca. 1.5 bis 2 CHF/m²).
- **Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Erdreich-Spitzenlastdeckung:** Platzbedarf, Lärmemissionen und bis zu einem gewissen Mass auch die Anschlussleistung können potenziell auch Erdwärmesonden reduziert werden, wenn sie als Spitzenlast eingesetzt werden. Die nähere Untersuchung dieser Arbeitshypothese zeigt, dass dabei darauf zu achten ist, dass zu Spitzenlastzeiten die Sole-Temperatur nicht zu stark abfällt. Kostenseitig sind andere Spitzenlastsysteme zwar kostengünstiger (bei z.B. 50 kW ist Gasspitzenlast rund 70 CHF/m² günstiger), aber eine Erdwärmesonde bietet den Vorteil, dass im Sommer ein gewisser Kühlbedarf abgedeckt werden kann und zudem Regeneration ermöglicht.

Diese auf WP basierenden Hauptmassnahmen werden durch folgende unterstützende LICS-Massnahmen ergänzt:

- **Senkung der Vorlauftemperatur durch wärmeverteilungs- und abgabeseitige Massnahmen:** Nebst der Möglichkeit, durch punktuelle Gebäudehüllenerneuerungen, Energiebedarf und Vorlauftemperatur zu senken, kann letzteres auch durch weitere spezifische Massnahmen erreicht werden: Deaktivierung der Nachtabenkung, Erhöhung des Durchflusses bei der Wärmeverteilung, Erhöhung der Wärmeabgabeleistung in kritischen Räumen. Die ersteren Massnahmen können brutto gewisse geringe Mehrverbräuche haben, welche jedoch durch den positiven Effekt auf den Jahresnutzungsgrad aufgewogen werden. Dies gilt auch für die punktuelle Erneuerung der Wärmeabgabe, welche zu

überschaubaren Investitionskosten (bis 50 CHF/m²) und in etwa kostenneutral umzusetzen ist. Anzumerken ist jedoch, dass eine umfassende Erneuerung der Wärmeabgabe in der Regel zu einem merklichen Anstieg der Jahreskosten führt (bis zu 10 CHF/m²) und in diesem Fall auch nicht als LICS bezeichnet werden kann, da Investitionen von rund 250 CHF/m² anfallen.

- **Kostengünstige Lüftungskonzepte:** Als Alternative zu Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung, deren Einbau im MFH-Bestand mit Investitionen von 150 bis über 200 CHF/m² relativ investitionskostenintensiv ist, kommen verschiedene Konzepte in Frage. Zum einen sind dies zahlreiche Fensterlüftungstechniken und zum anderen verschiedene Varianten von Lüftungsanlagen. Bei den Fensterlüftern wird zwischen zwei Ansätzen unterschieden: aktive unter Einbezug des Nutzenden und passive ohne Nutzereinbezug, dafür inkl. Sensorik und Automation. Einige Ansätze funktionieren ohne, andere mit Ventilatoren. Bei den Lüftungsanlagen stehen v.a. Abluftanlagen im Vordergrund, entweder mit oder ohne Nutzung der Abwärme durch WP. Mit diesen Ansätzen lassen sich die Kosten um die Hälfte oder um drei Viertel reduzieren. Der energetische Nutzen ist u.U. auch geringer, wobei eine fehlende Wärmerückgewinnung durch eine bedarfsgerechtere Regelung ganz oder zumindest teilweise kompensiert werden kann.
- **Warmwasser:** Mittels Duschrinne mit eingebauter Wärmerückgewinnung kann der warmwasserbezogene Energiebedarf um 3 bis 8 kWh/m² reduziert werden. Die Mehrkosten gegenüber einem Abfluss oder einer herkömmlichen Duschrinne betragen rund 23 bis 30 CHF/m² EBF, dies bei der Voraussetzung, dass die sanitären Anlagen ohnehin erneuert werden. Je nach Warmwasser-Wärmeerzeugung (Elektroboiler, fossile Heizung, zentrale WP) können damit die Jahreskosten leicht steigen oder leicht sinken. Zudem kann wie bei der Raumwärme auch beim Warmwasser die Vorlauftemperatur gesenkt werden, typischerweise um 5°C bis 15°C, so dass beim Einsatz von WP sich die JAZ entsprechend erhöhen lässt, hierbei ist die Thematik der Legionellen im Auge zu behalten (gemäss geltenden Normen und Empfehlungen).

Fazit: mit punktuellen, aber im Einzelfall zielgerichteten Massnahmen wie Dämmung von Estrichboden und Kellerdecke, Reduktion der Vorlauftemperatur, «Kontrolle» des Luftwechsel, Reduktion der Verteilverluste und Wärmerückgewinnung beim Warmwasser lassen sich die Voraussetzungen schaffen, dass monovalente und bei mittleren und grösseren Leistungen bivalente Luftwasser-Wärmepumpen zu einer Low-Invest-Cost-Solution kombiniert werden können.

Bewertung aus Eigentümersicht

Anhand der Fallstudien kann der Ansatz von LICS-Lösungen an konkreten Objekten illustriert werden. Durch die recht unterschiedlichen Gebäude kann ein breites Spektrum an verschiedenen Gebäude- und Standorttypen abgedeckt werden. Für die vergleichende werden fünf generische Strategien definiert, die mit zwei Referenzfällen verglichen werden:

- Referenzfall 1 (Ref1): Instandsetzung Fassade und Fenster sowie 1 zu 1 Heizungsersatz
- Referenzfall 2 (Ref2): Fensterersatz (falls notwendig) sowie Massnahmen aus Ref1
- Strategie 1 (S1) Dämmung der gesamten Gebäudehülle + fossiles Heizsystem
- Strategie 2 (S2) Dämmung der gesamten Gebäudehülle + nicht-LICS für Heizsystem

- Strategie 3 (S3) Dämmung der gesamten Gebäudehülle + LICS für Heizsystem
- Strategie 4 (S4) LICS-spezifische Dämmung der Gebäudehülle + LICS für Heizsystem
- Strategie 5 (S5) Keine Dämmung + LICS für Heizsystem

Die Bewertung erfolgt anhand der direkten CO₂-Emissionen, den Treibhausgasemissionen und der Primärenergie gemäss SIA-Effizienzpfad sowie anhand der Investitions- und Jahreskosten (letztere unterteilt in Kapital und Abschreibung, Unterhalt und Energie).

Die Resultate zeigen, dass die Investitionskosten bei den analysierten Gebäuden für die Strategien mit LICS-Lösung (S₃ bis S₅) in einem überschaubaren Rahmen gehalten werden können. Für Strategie S₃ fallen sowohl die Investitionskosten als auch die totalen Jahreskosten in der Regel nur leicht höher aus als bei der fossilen Lösung (S₁), dies bei deutlich geringeren Emissionen. Wenn keine oder nur sogenannte LICS-spezifischen Gebäudehüllenmassnahmen ergriffen werden, liegen die Investitionskosten sogar tiefer als bei fossilen Lösungen. Bei diesen Strategien (S₄ und S₅) können die Emissionen trotzdem deutlich reduziert werden, womit auch die Einhaltung von CO₂-Grenzwert und Richtwert gemäss SIA 2040 möglich ist.

Bewertung auf Ebene Gebäudepark

Die Bewertung auf Gebäudeparkebene enthält die beiden folgenden hauptsächlichen Elemente:

- Charakterisierung des gesamtschweizerischen Potenzials bzw. von Restriktionen betreffend der Nutzung von Luft/Wasser-Wärmepumpen.
- Aufzeigen verschiedener Einflussfaktoren auf ausgewählte Bewertungsindikatoren, die aus Sicht des vorliegenden Projekts von Interesse sind:

Auf diese beiden Elemente wird nachfolgend näher eingegangen.

Potenziale und Restriktionen bei der Nutzung von Luft/Wasser-WP

Luft/Wasser-Wärmepumpen (L/W-WP) spielen bei den Low-Invest-Cost-Solutions (LICS) eine zentrale Rolle. Durch geeignete unterstützende LICS-Massnahmen (moderate Bedarfsreduktion, Senkung der Vorlauftemperaturen, sorgfältige Dimensionierung und Inbetriebnahme, geeignete Produktwahl) lassen sich solche WP meistens einbauen, wobei bei mittleren und grösseren Leistungen (ab 30 kW) bivalente Ansätze von Vorteil sein können. Diesem grundsätzlich grossen Potenzial aus der Einzelgebäudeperspektive sind die Standort-Restriktionen gegenüber zu stellen, welche aus der Perspektive des Gebäudekontexts zu Potenzialeinschränkungen führen. Zum Gebäudekontext gehören (i) die Gebäudeumgebung, (ii) die (leitungsgebundene) energetische Infrastruktur sowie (iii) die Verfügbarkeiten und Restriktionen (bzgl. der Nutzung) von Energiequellen. Einschränkungen ergeben sich aufgrund der Lärmthematik und den damit verbundenen Abstandsanforderungen (abgeleitet aus Grenzwerten der aktuellen Lärmschutzverordnung und fallweise auch aus dem Vorsorgeprinzip) sowie aufgrund des beschränkten Platzangebots innerhalb und ausserhalb der Gebäude. Eine Reduktion der Lärmemissionen ist deshalb von grosser Bedeutung. Diese kann durch verschiedene Massnahmen erreicht werden: Wahl des WP-Produkts, Verwendung von Schalldämpfern, Einhausung und nicht zuletzt eine bivalente Konstellation: eine Reduktion der Leistung um die Hälfte ermöglicht in etwa die Halbierung des Abstands zwischen WP und Empfangsort.

Der Einfluss der Lärmemissionen bzw. entsprechenden Reduktionsmassnahmen auf das Potenzial von Luft/Wasser-Wärmepumpen wird durch eine Parameterstudie in einem Geographischen Informationssystem (GIS) aufgezeigt. Die Parameterstudie unterscheidet 3 Varianten, bei denen jeweils die Mindestabstände (aus Lärmschutzgründen) variiert werden. Die Mindestabstände stützen sich bei der Variante 1 (grosse Abstände) auf spezifische Berichte (der Stadt Zürich), bei der Variante 2 (mittlere Abstände) auf Auswertungen von Messergebnissen des WP-Testzentrums und bei der Variante 3 (geringe Abstände) auf Auswertungen von Produktbeschreibungen zu besonders leisen Geräten (sinngemäss können entsprechende Ergebnisse auch durch Schallschutzmassnahmen erzielt werden). Anhand der GIS-Analyse wird zunächst das Potenzial für den Kanton ZH bestimmt und dann anhand eines statistisches Modells auf Ebene der Schweiz hochgerechnet. Dabei wird nach Gebäudesektor (EFH, MFH, NWG), Bauzonen (Wohnen und übrige), Bebauungsdichte und Gebäudeenergiekennzahl differenziert.

Die Analysen führen zu folgendem Ergebnis: Je nach Variante und Gebäudesektor ist, bezogen auf die Energiebezugsfläche, für knapp 20% (NWG, Variante 1: grosse Mindestabstände) bis fast 100% (EFH, Variante 3: kleine Mindestabstände) der Gebäude eine Wärmepumpe möglich. Die grössten Einschränkungen bestehen also bei den Nicht-Wohngebäuden; bei diesen ist der Aufstellungsort Flachdach in der Folge weiter zu untersuchen.

Auswirkungen auf verschiedene Ergebnisgrössen auf der Gebäudeparkebene

Um die Relevanz der in diesem Projekt durchgeführten Analysen zu verschiedenen Einflussgrössen aufzuzeigen, werden mit dem GPM verschiedene Modellläufe (ML) durchgeführt. Konkret werden nachfolgende Einflussfaktoren untersucht:

1. Art der Leistungsberechnung: Wärmeleistung gemäss prSIA 384/1:2021 im Vergleich zum bisherigen Berechnungsansatz gemäss SIA 384/2.
2. Auswirkung der Aktualisierung der Kostenkennwerte.
3. Wirkung der Anforderung zur Begrenzung der CO₂-Emissionen auf 6 kg CO₂/m² (zum Zeitpunkt einer fälligen Heizungserneuerung).
4. Veränderungen durch den Einzug der LICS, insbesondere bivalente WP.
5. Zusatzpotenzial der Luft/Wasser-WP durch leise WP-Lösungen

Bezugnehmend auf die einleitend formulierten Fragestellungen und Zielsetzungen dieses Projekts werden die Auswirkungen auf ausgewählte Ergebnisindikatoren mittels verschiedener Modellläufe (ML) untersuchen und die Ergebnisse werden wie folgt zusammengefasst:

- Die Nutzenergie und das Total der Endenergie für Wärmezwecke werden kaum durch die o.g. Faktoren beeinflusst
- Die Struktur der Endenergie pro Heizsystem bzw. pro Energieträger wird am meisten durch die Emissionsbeschränkung auf 6 kg CO₂/m² beeinflusst. Diese bewirkt, dass die erneuerbaren Systeme Holz (Schnitzel und Pellets summiert) und Wärmepumpen eine deutlich höhere energetische Bedeutung erlangen. Bemerkenswert ist hierbei das Verhältnis zwischen den Holzheiz- und den Wärmepumpensystemen, welches 2050 beinahe ausgeglichen ist. Dies lässt sich erklärbar vor allem durch die Relation der Investitionskosten bei den höheren Leistungsklassen erklären (in der Tat würden die angenommenen Energiepreise würden eher für die Installation von WP sprechen). Dass die direkt-

emissionsfreie Fernwärme nicht eine höhere Bedeutung erlangt, ist auf die geringe und nur langsam zunehmende Verfügbarkeit (Annahme im GPM) zurückzuführen.

- Unter der Voraussetzung einer Emissionsbeschränkung auf 6 kg CO₂/m² erreichen die bivalenten Heizsysteme mit Gas (und Öl) kombiniert mit Wärmepumpen bis 2050 einen energetischen Anteil von knapp 10%. Anzumerken ist, dass die bivalenten Systeme die Anteile der monovalenten Öl- und Gassysteme kaum verändern, sondern dass sie ihre Anteile zulasten von Holz und Wärmepumpen gewinnen. Dies dass bivalente Systeme im Kontext der gesetzten CO₂-Anforderung vor allem einen ökonomischen Nutzen entfalten.
- Die Aktualisierung der Berechnung der Heizleistung und die Aktualisierung der Kostenkennwerte hat einen vergleichsweise geringeren Einfluss auf die strukturelle Entwicklung (bei den EFH nimmt Gas zwischen 2020 und 2050 etwas weniger stark zu und bei den DL-Gebäuden die fossilen Energieträger etwas weniger stark ab).
- Die Entwicklung bei den direkten CO₂-Emissionen leitet sich aus den Ergebnissen pro Energieträger ab: am grössten ist der Einfluss der erwähnten Emissionsbeschränkung, mit der die Emissionsreduktion zwischen 2020 und 2050 auf knapp -80% gesteigert wird (im Vergleich zu -30% ohne eine Emissionsbeschränkung). Einen vergleichsweise geringeren Einfluss haben die geänderte Methodik der Leistungsberechnung sowie die Aktualisierung der Kostenkennwerte. Letztere bewirkt, dass die Emissionen weniger stark zurückgehen (-29% statt -36%), weil bei den alten Kostenkennwerten die Instandsetzung für Öl und Gasheizungen relativ hoch waren (was den Wechsel weg von diesen Systemen zu stark begünstigt hat). Einen noch geringeren Gesamteffekt auf die Emissionen hat die Einführung der bivalenten Systeme. Grund: sie erreichen «nur» einen Anteil von knapp 10% und pro System sind die restlichen Emissionen 80% bis 90% tiefer als bei vollfossilen Systemen.
- Bei den gesamten energie-bedingten THG-Emissionen, also inkl. der Beiträge der vorgelegten Ketten, hat ebenfalls die erwähnte Emissionsbeschränkung die grösste Bedeutung. Hervorzuheben ist, dass nach deren Einführung eine Restmenge von knapp 3 Megatonnen (Mt) CO₂ Äquivalent aus den fossilen Energieträgern Öl und Gas und eine fast gleich grosse Menge aus der Erzeugung und Bereitstellung von Holz, Fernwärme und Strom. Den indirekten Emissionen der Energieerzeugung und -bereitstellung (Scope 2 und 3 gemäss THG-Protokoll) ist entsprechend ein erhöhtes Augenmerk zu widmen.
- Die verschiedenen Einflussfaktoren haben auch eine gewisse Auswirkung auf den Markt an jährlichen Neu-, Erneuerungs- und Instandsetzungsinvestitionen. Dieser hat im Bereich Heizanlagen ein Volumen von rund 2.5 bis 3 Mia. CHF pro Jahr, wobei der grösste Anteil auf den Gebäudebestand entfällt und der Neubau eine vergleichsweise geringe Rolle spielt. Mit der Einführung einer Anforderung von max. 6 kg CO₂ pro m² EBF nimmt das Investitionsvolumen insgesamt leicht zu (zwischen gut 10% und knapp 15%). Ein Teil dieser Zunahme kann kompensiert werden, indem zielgerichteter dimensioniert wird und indem bivalente Systeme eingesetzt werden. Strukturell ist eine Verschiebung von fossil zu erneuerbar festzustellen. Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht erscheint damit eine Dekarbonisierung des Gebäudesektors eine finanzierbare Dimension einzunehmen, selbst ohne Berücksichtigung der eingesparten Energiekosten.
- Bei den technikbedingten Jahreskosten (annualisierte Investitionen in Form von Abschreibung und Verzinsung sowie jährliche Betriebs- und Unterhaltskosten, jedoch ohne Ener-

giekosten) ist die Anforderung von max. 6 kg CO₂/m² mit einer leichten Zunahme von 10% bzw. 12% (2035 bzw. 2050) zu rechnen. Ein Teil dieser Zunahme kann kompensiert werden, indem zielgerichteter dimensioniert und indem bivalente Systeme eingesetzt werden, womit sich die Zunahme auf 7% bzw. 10% (2035 bzw. 2050) reduziert; hierbei noch nicht berücksichtigt sind die eingesparten Energiekosten.

Fazit

Durch das Projekt Low-Invest-Cost-Sanierungen konnten neuartige Lösungen für investitionskostengünstige Lösungen zur Erreichung von tiefen CO₂-Emissionen im Gebäudebereich erarbeitet werden. Die vorgeschlagenen Lösungen wurden dabei aus Sicht der Eigentümer, anhand einer Fallstudie mit einer breiten Palette an konkreten Gebäuden verifiziert. Je nach Gebäudetyp können eine oder mehrere kostengünstige Lösungen empfohlen werden, dies bei moderaten Investitionskosten und einer deutlichen Senkung der Emissionen im Vergleich zu konventionellen Lösungen (basierend auf fossilen Heizsystemen), womit der Grenzwert von 6 kg CO₂ pro m² EBF eingehalten werden kann. Die vorgeschlagenen LICS-Lösungen können beispielsweise bei schlecht gedämmten Altbauten zum Einsatz kommen. Es ist wichtig, die vorgeschlagenen Lösungen zu kommunizieren, damit Gebäudeeigentümer darauf aufmerksam werden und diese umsetzen können.

Die Bewertung auf Ebene Gebäudepark zeigt, dass zwar ein erhebliches Potenzial für Luft/Wasser-Wärmepumpen (als Kern für eine LICS-Lösung) auf Ebene der Gesamtschweiz besteht, dass dieses aber stark vom Umgang mit der Lärmthematik abhängig ist. Diesem Aspekt ist bei der Umsetzung eine hohe Bedeutung beizumessen. Bivalente LICS-Lösungen können hierzu einen kostengünstigen Beitrag leisten. Die Nutzung der Potenziale wiederum hängt stark von den geltenden ökonomischen und energiepolitischen Rahmenbedingungen ab; so würde z.B. eine Anforderung im Sinne eines Grenzwerts von 6 kg CO₂ pro m² EBF, der beim fälligen Ersatz der Heizanlage einzuhalten wäre, eine grosse Wirkung entfalten. Damit könnten die jährlichen Emissionen von heute 12 Mt CO₂ auf 2-3 Mt bis 2050 gesenkt werden; ohne Anforderung würden die Emissionen bis 2050 nur auf 8 Mt zurück gehen. Mit Verweis auf Netto-Null-Ziele des Bundes und vieler Städte und Gemeinden sind solche bivalenten Lösungen entweder als Übergangslösungen vorzusehen (falls z.B. für eine befristete Periode bestehende fossile Energieträger für die Deckung der Spitzenlast eingesetzt werden sollen) oder es ist auch bei der Spitzenlastdeckung von erneuerbaren (wenn möglich lagerfähigen) Energien auszugehen. Diesen Aspekten ist bei der Konzeption und Umsetzung von energie- und klimapolitischen Massnahmen eine hohe Bedeutung beizumessen.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Die Raten der energetischen Erneuerungen im Schweizer Gebäudepark sind im Allgemeinen und im Besonderen im Bereich der Gebäudehülle tief (bei rund 1% des Gebäudebestands pro Jahr, was zu einer Effizienzsteigerung von deutlich weniger als 1% pro Jahr führt, siehe Jakob et al., 2014), Instandsetzungen und Sanierungen werden kaum gemäss einem langfristigen Gesamtkonzept, sondern eher ad hoc und schrittweise vorgenommen, wie nach früheren Arbeiten (z.B. Banfi et al., (2011), Banfi et al., (2012)) auch das BFE-Projekt SANTEP 2015 (Lehmann, Ott, Bade, Inderbitzi, & Rutz, 2015) wieder aufgezeigt hat. Die Untersuchungen zeigten insbesondere, dass neue Fassadendämmungen bei Altbauten selten sind, u. a., weil sie als zu teuer (zu hohe Investitionskosten) eingeschätzt werden. Aus verschiedenen und oft nachvollziehbaren Gründen wird bei Sanierungen häufig auf tiefe Investitionen fokussiert. Damit können die grossen Effizienzgewinne von Fassadendämmungen nicht realisiert werden. Typische Gründe sind:

- Andere Lebensprioritäten (Familiengründung, Rentensicherung, hedonistische Wünsche)
- Mismatch beim Zeithorizont zwischen Eigentümer (Lebenserwartung) und Payback-Erwartung oder wirtschaftlicher Amortisationsdauer der Massnahmen
- Dadurch reduzierte Finanzierungsmöglichkeit
- Unsichere Wirtschaftlichkeit wegen der langen Rückzahlfristen und der damit verbundenen Unsicherheit bei den Energiekosteneinsparungen
- Falsche oder fehlende Informationen bzw. Vorstellungen über die Life-Cycle-Kosten von energetischen Erneuerungsmassnahmen.
- Bei vermieteten Objekten werden zudem die Auswirkungen auf die Ertrags- bzw. Renditeverhältnisse unter Berücksichtigung der bestehenden Überwälzungs- und der steuerlichen Abzugsmöglichkeiten oft zu wenig berücksichtigt.
- Langfristige Bindung des Kapitals und dadurch Verlust von anderen wirtschaftlichen Optionen (Wertminderung nach Realloptionenansatz)

Hohe Investitionskosten, wie sie bei umfassenden Gebäudehüllenerneuerungen oder Gesamtsanierungen oft auftreten, stellen daher aus energie- und klimapolitischer Sicht ein grosses Hemmnis dar. Sie sind einer der Hauptgründe für die Diskrepanz zwischen tatsächlicher und angestrebter Sanierungsrate.

1.2 Motivation des Projektes

Arbeiten im Rahmen des Forschungsprojekts «Nachhaltige Gebäudeerneuerung in Etappen – SANETAP» (Lehmann et al., 2015) und eigene Berechnungen der TEP Energy zeigen auf, dass ambitionierte Ziele wie die des SIA-Effizienzpfads Energie SIA 2040 (Primärenergie und Treibhaus-gase), der MuKE und von Minergie auch bei Gebäudeerneuerungen ohne zusätzliche Fassadendämmung erreichbar sind. Bedingungen dazu sind, dass die Wärmezeugung ganz oder zu einem wesentlichen Teil über erneuerbare Energieträger erfolgt und dass andere Dämm- und Erneuerungsmassnahmen in hoher energetischer Qualität umgesetzt werden.

Zwischenzeitlich hat die treibhausgasbedingte Klimaproblematik im öffentlichen Bewusstsein grössere Aufmerksamkeit erreicht und die Schweiz hat das Pariser Klimaabkommen ratifiziert. Dadurch haben die Zielsetzungen der Klimapolitik einen hohen Stellenwert erhalten. Die daraus abgeleitete Dringlichkeit erfordert auch im Gebäudebereich angepasste Strategien, um die Reduktion der Treibhausgasemissionen von Gebäuden zu beschleunigen. Massnahmen zur schnelleren Transformation der Energieversorgung des Gebäudebereiches in Richtung CO₂-Neutralität sollten verstärkt und priorisiert werden. Die Gebäude-Energieversorgung weist im Vergleich zu umfassenden Massnahmen an der Gebäudehülle eine vergleichbare oder gar bessere Wirtschaftlichkeit und vor allem einen geringeren Investitions- und Finanzbedarf auf und sieht sich auch deswegen geringeren Realisierungshemmnissen gegenüber und verspricht schnellere Fortschritte bei der Reduktion der Treibhausgasemissionen (2 bis 3% pro Jahr statt weniger als 1% pro Jahr).

Gefragt sind Ansätze, welche bisherige Investitionshemmnisse zur Reduktion der CO₂-Emissionen überwinden. Die Frage nach adäquaten Erneuerungslösungen hat sich in den letzten Jahren auch deshalb akzentuiert, weil der Bundesrat ein subsidiäres Verbot von fossilen Heizanlagen und einen Grenzwert von 6 kg CO₂/m² für Wohngebäude prüfen liess und das Parlament im Herbst 2020 das CO₂-Gesetz mit CO₂-Grenzwerten für bestehende Gebäude (bei einem Heizungersatz) (Absenk-pfad) verabschiedet hat. Bei ineffizienten Gebäuden kommen solche Anforderungen z.T. einem Verbot von rein fossilen Heizungen gleich.

Im Fokus der zu erarbeitenden Massnahmenkombinationen steht der Einsatz von erneuerbaren Energien als zentrale Massnahme zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Bekannte Hemmnisse in diesem Bereich werden bei der Entwicklung und bei den Umsetzungsvorschlägen berücksichtigt¹.

¹ Gemäss der Studie «Umstieg von fossilen auf erneuerbare Energieträger beim Heizungersatz» von Energieforschung Stadt Zürich (Lehmann, Meyer, Kaiser, & Ott, 2017) und gemäss der «Vollzugsuntersuchung Heizkesseleratz 2017» des AWEL Kanton Zürich (Gruenberg + Partner 2017) zieht die Mehrheit der Gebäudeeigentümerschaften bei einem fossilen Heizungersatz eine erneuerbare Alternative gar nicht in Erwägung. Das könnte u. a. auch damit zu tun haben, dass die Leute meinen, man könne erneuerbare Energien nur einsetzen, wenn das Gebäude zusätzlich aussen gedämmt werde. Weil sie das nicht wollen, prüfen sie keine Alternativen

1.3 Projektziele

Ziel dieses Projektes im Rahmen des BFE-Forschungsprogramms Gebäude und Städte ist es, für die Eigentümerschaften attraktive, d. h. investitions günstige Ansätze für erneuerbare Energien und mehr Energieeffizienz zu identifizieren. Damit wird gezeigt, wie auch mit kostengünstigen Lösungen ambitionierte Klima- und Energieziele erreicht werden können. Durch das Aufzeigen praxisnaher Massnahmenkombinationen und die Entwicklung neuer Ansätze zur Verwendung erneuerbarer Energien und zur Energieeffizienzsteigerungen im Schweizer Gebäudepark soll ein Beitrag zur Erreichung der Ziele der Energiestrategie 2050 geleistet werden. Konkret sollen sowohl die Potenziale als auch die Potenzialeinbussen von Low-Invest-Cost-Sanierungen (LICS) in einer Einzelfall- und in einer Gebäudeparkbetrachtung aufgezeigt werden. Die Adressierung folgender Fragen soll hierbei als Richtschnur dienen:

- Mit welchen Sanierungskonzepten (Massnahmenkombinationen) können ambitionierte CO₂-Grenzwerte erreicht werden (z.B. gemäss Vorschlag des Bundesrates oder des Absenkpfad des Parlaments) und welche davon weisen tiefe Investitionskosten auf?
- Welche Unterschiede bestehen bei den geeigneten Sanierungskonzepten zwischen verschiedenen Gebäude- und Siedlungstypen bzw. Baudichten (Stadt-Land), d.h. je nach Verfügbarkeit von leitungsgebundenen Energieträgern, je nach der räumlichen Energiedichte der Nachfrage, je nach der örtlichen Verfügbarkeit von Potenzialen erneuerbarer Energien?
- In welchem Umfang können investitionskostengünstige Massnahmenkombinationen, so genannte Low-Invest-Cost-Sanierungen (LICS), im Gebäudepark als Ganzes zu den verschiedenen klima- und energiepolitischen Zielen und Instrumenten (Paris-Abkommen, Energiestrategie 2050, SIA-Effizienzpfad, 2000-Watt-Gesellschaft, Minergie) beitragen?
- Welcher Teil der Potenziale kann durch LICS nicht erschlossen werden, weil sie zu wenig weit gehen? Und welche weiteren Nachteile sind zu beachten (z.B. markanter Anstieg des elektrischen Leistungsbedarfs an kalten Wintertagen bei hohen WP-Anteilen in unsanierten Gebäuden, höherer Bedarf an (knappen) erneuerbaren Energien, etc.)?
- Genügen die heute verfügbaren und verwendeten technischen Produkte und konzeptionellen Herangehensweisen oder sind neue, innovative Ansätze zu entwickeln und wenn ja, welche?

1.4 Untersuchungsgegenstand

Untersucht werden Massnahmen und neue Low-Invest-Cost Sanierungen zur Erreichung eines tiefen CO₂-Grenzwerts bei Bestandsbauten. Grundsätzlich stehen Wohngebäude im Fokus der Analyse. Diese werden durch Büro- und Schulgebäude ergänzt. Das Gebäude- und Massnahmenspektrum wird nachfolgend kurz eingeführt (Kap. 1.4.1 und Kap. 1.4.2) und in der Folge basierend auf die Typologisierung (Kap. 3) weiter vertieft.

1.4.1 Gebäudetypen

Der Untersuchungsgegenstand in diesem Projekt umfasst zwei Ebenen: die Einzelgebäudeebene und die Gebäudeparkebene. Zwischen diesen beiden Ebenen ist ein Bezug herzustellen, damit sich die Aussagekraft der jeweiligen Ergebnisse gegenseitig stärken.

Für die Einzelgebäudeebene werden Gebäudetypen definiert, für welche praxisnahe Massnahmenkombinationen zur Erreichung der CO₂-Grenzwerte entwickelt werden sollen. Dabei werden sowohl die Häufigkeit der Gebäudetypen im Gebäudepark als auch die energetischen und standortbedingten Potenziale erneuerbarer Energien berücksichtigt.

Für die Beurteilung, welche Fälle für die Entwicklung von Low-Invest-Cost-Sanierungslösungen besonders relevant sind, werden zwei Dimensionen berücksichtigt:

- Gebäudetypologie: hierbei geht es um die Typisierung des Gebäudebestands in Bezug auf Charakteristika wie Grösse, Bauart/Konstruktionstyp, Gebäudehüllenstruktur (Fensterarten und -grössen, Dachform), Nutzung (inkl. Reserven, z.B. im Dachraum), Technisierung, bisher durchgeführte Effizienzmassnahmen etc.
- Energiebezogene Standorttypologie: hierbei geht es um die Verfügbarkeit von leitungsgebundenen Energieträgern (z.B. Gas, Fernwärme) und von lokalen Potenzialen erneuerbarer Energiequellen oder um Einschränkungen zur Nutzung solcher Potenziale.

Die vollständige Liste der Fallbeispiele wird in Kap. 6.1 dargestellt.

1.4.2 Massnahmenspektrum

Um die direkten und indirekten CO₂-Emissionen von bestehenden Gebäuden substantiell zu reduzieren, gibt es im Wesentlichen die folgenden hauptsächlichen und ergänzenden «Strategischen Ansatzpunkte» (SAP):

1. **SAP: Einsatz Erneuerbare:** Vollständiger oder beinahe vollständiger Ersatz der direkten Nutzung von fossilen Energieträgern für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser
2. **SAP: Energieeffizienz** durch die Reduktion des Wärme-Nutzenergiebedarfs
 - Reduktion Transmissionsverluste: Wärmedämmung der Gebäudehülle
 - Reduktion Luftwechselperluste: Dichtigkeit, Luftwechselmanagement, WRG
 - Warmwasser: Reduktion Speicherverluste, Wärmerückgewinnung
3. **SAP: Effizienzsteigerung bei der Energieumwandlung** von End- zu Nutzenergie und bei der Wärmeverteilung (Raumheizung und Warmwasser)
 - Reduktion der VL-Temperatur, Anpassung der Heizkurve
 - Dämmung bei der Wärme- und Warmwasserverteilung
 - Reduktion der Zirkulationsverluste durch betriebliche Massnahmen
4. **SAP: Erneuerbare Elektrizität**, lokal produziert oder beschafft
5. **SAP: Gezielter Einsatz von Materialien** mit geringen Grauen Emissionen
6. **SAP: Effizienzsteigerung bei Elektrogeräten**

Die Hebelwirkung der verschiedenen SAP ist je nach Betrachtungsparameter (direkte CO₂-Emissionen gemäss CO₂-Gesetz (Scope 1), indirekte und Graue THG-Emissionen bzw. Primärenergie gemäss SIA-Effizienzpfad (Scope 2 und 3)) und je nach Reihenfolge ihrer Erreichung unterschiedlich (siehe INSPIRE-Projekt, Jakob, Ott, et al. (2014)). Mit Verweis auf den Leitindikator der direkten Emissionen und auf die ambitionierte Zielsetzung von 6 kg CO₂ pro m² EBF ist der 1. SAP ins Zentrum der Überlegungen zu stellen: die Nutzung von erneuerbaren Energien bei der Wärmeproduktion. Je nach Lösung ist der 1. SAP durch weitere Massnahmen zu unterstützen, z.B. um überhaupt deren Einsatz und effiziente Betriebsweise zu ermöglichen (z.B. bei den WP) oder um indirekte Auswirkungen zu vermeiden oder zu reduzieren. Dazu dienen in diesem Projekt v.a. SAP 2 und 3. Die übrigen SAP sind in der Praxis ebenfalls zu berücksichtigen, werden nachfolgend aber nicht spezifisch betrachtet.

Das Massnahmenspektrum wird also in zwei Kategorien strukturiert: Haupt- und unterstützende Massnahmen. Diese beiden Massnahmentypen, sind so miteinander zu kombinieren, dass tiefe CO₂ und THG-Emissionen und tiefe Investitionskosten resultieren (und im Idealfall auch tiefe Lebenszykluskosten, dies als ergänzender Indikator).

Hauptmassnahme (Kern) der Low-Invest-Cost Solution (LICS)

Nutzung von erneuerbarer Energie bei der Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser, die darauf abzielt, die Emissionen ganz oder beinahe ganz zu eliminieren. Bei den nachfolgenden Vorschlägen wird bereits auch dem Umstand Rechnung getragen, dass gewisse erneuerbare Energiequellen nur begrenzt verfügbar sind und/oder nicht an jedem Standort verfügbar sind (siehe z.B. Analysen in der Studie zur Dekarbonisierung des Wärmesektors im Auftrag der Wärmeinitiative Schweiz (Martin Jakob et al., 2020) und entsprechende Arbeiten im Rahmen der BFE-Energieperspektiven 2050+ (Kemmler et al., 2021)).

Tabelle 1 Massnahmenspektrum im Sinn einer Long-list (Teil Hauptmassnahmen) inkl. Motivation und Erstüberlegung

System	Motivation, Erstüberlegung
Monovalente Luft/Wasser-Wärmepumpe	Ohne direkte CO ₂ -Emissionen, tiefe Investitionskosten, einfacher Ansatz (nur 1 System). Voraussetzung: geringe Lärmentwicklung und Eignung für hohe Vorlauftemperaturen.
Monovalente Erdsonden-Wärmepumpe	Ohne direkte CO ₂ -Emissionen, geringer Platzbedarf, einfacher Ansatz (nur 1 System), jedoch (etwas) höhere Kosten.
Nutzung von erneuerbarer Nah- oder Fernwärme (sowohl Hoch- als auch Niedertemperaturnetze)	Ohne direkte CO ₂ -Emissionen, geringer Platzbedarf, einfacher Ansatz, tiefe Investitionskosten (je nach Bepreisungspolitik des Anbieters), jedoch nicht überall verfügbar. Gebäudeseitig ist bei konventionellen (Hochtemperatur-)Fernwärmenetzen eine Übergabestation (Wärmetauscher) und bei Niedertemperaturnetzen eine Wärmepumpe erforderlich, was sich in unterschiedlichen Investitionskosten niederschlägt.
Bivalente Wärmepumpen mit folgender Spitzenlast:	Bivalenz: Markante Reduktion der installierten WP-Leistung (und damit von Kosten, Platz, Lärm etc.) und der Winterstromspitze und trotzdem hoher erneuerbarer Anteil.
Erdgas/Biogas oder PtG	Gasheizungen und -netz (noch) weit verbreitet, dank Bivalenz hohem Biogas-Anteil (oder PtG) möglich, ist jedoch als Übergangslösung einzustufen (Wirtschaftlichkeit Gasversorgung)
Flüssiggas	Alternative für leitungsgebundenes Gas oder für Heizöl als Spitzenlast, lagerfähig und ggf. erneuerbar.
Pellets	Erneuerbarer und lagerfähiger Energieträger, bei Einsatz als Spitzenlast wird nur ein kleines Pelletslager benötigt.
Heizöl Bio100	Alternative zu Heizöl, bestehend aus Fatty-Acid-Methyl-Ester (FAME), das durch Umesterung pflanzlicher oder tierischer Fette und Öle gewonnen wird, bei Einsatz als Spitzenlast wird nur ein kleiner Tank benötigt.
Erdsonden-Wärmepumpe	Dank Rolle als Spitzenlast geringere Sondenlänge und damit tiefere Investitionskosten und geringere energetische Belastung (weniger Regenerationsbedarf).

Quelle: Dieses Projekt.

Unterstützende LICS-Massnahmen

Um die Investitionskosten der Hauptmassnahmen zu reduzieren und um diese überhaupt zu ermöglichen und/oder einen effizienten Betrieb zu gewährleisten, sind folgende unterstützende Massnahmen Bestandteil des betrachteten Massnahmenspektrums. Diese Massnahmen zielen darauf ab, den Nutzenergie- und den Leistungsbedarf sowie die Vorlauftemperaturen zu reduzieren. Letzteres ist v.a. beim Einsatz von Wärmepumpen wichtig. Folgende (arbeitshypothetisch kostengünstige) Massnahmen werden betrachtet:

Tabelle 2 Massnahmenspektrum im Sinn einer Long-list (Teil unterstützende Massnahmen)

Bereich	Massnahmen
2. SAP: Effizienz durch die Reduktion des Wärme-Nutzenergiebedarfs	
Reduktion Transmissionsverluste: Wärmedämmung der Gebäudehülle	<ul style="list-style-type: none"> • Dämmung des Estrichbodens oder des Steildachs von innen (falls möglich und opportun). • Dämmung der Kellerdecke • Innenwärmedämmung, ggf. nur punktuell
Reduktion Luftwechselverluste:	<ul style="list-style-type: none"> • Dichtigkeit sicherstellen, kombinieren durch dezentrale Konzepte wie automatische Fensteröffner • Luftwechselmanagement durch Abluft-Anlagen • WRG: dezentrale Ansatz Fensterbank-WRG etc.
Warmwasser	Reduktion Speicherverluste, Wärmerückgewinnung
3. SAP: Effizienzsteigerung bei Energiewandlung, -verteilung und -abgabe	
Wärmeverteilung	<ul style="list-style-type: none"> • Dämmung von Heiz- und Warmwasserverteilleitungen • Erhöhung Durchfluss, um Differenz zwischen Vor- und Rücklauf und damit Vorlauftemperatur zur reduzieren
Wärmeabgabe	Erhöhung der Flächen, z.B. durch den Einsatz von <ul style="list-style-type: none"> • grösseren oder mehr Radiatoren • Einbau von Fussboden-, Wand- oder Deckenheizungen

Quelle: Dieses Projekt.

Vergleichs-Massnahmen

Nicht als LICS werden folgende Massnahmen betrachtet:

- Konventionelle Fassadenaussenwärmedämmungen, da gemäss Arbeitshypothese deren Investitionskosten insgesamt relativ hoch sind und Energie und Emissionen trotzdem nicht genügend reduzieren, wie Voranalysen der Autoren dieses Berichts ergaben. Sie werden jedoch ins Massnahmenspektrum zu Vergleichszwecken einbezogen (und auch, um diese Arbeitshypothese zu prüfen).
- Auch der Fenstersatz wird nicht als LICS-Massnahme betrachtet, ebenfalls wegen mutmasslich eher hohen Kosten (siehe Jakob et al., 2010, Ott et al., 2013 und vor allem, weil Fenster trotzdem ersetzt werden, nicht nur bzw. kaum aus energetischen Gründen (Ott et al., 2013). Auch sie werden zu Vergleichszwecken ins Massnahmenspektrum einbezogen.
- Solarthermische Anlagen

Aus methodischer Sicht sind die zu erarbeitenden LICS-Ansätze mit Instandsetzungsmassnahmen zu ergänzen, die zum gegebenen Zeitpunkt oder zu einem späteren Zeitpunkt anfallen würden bzw. vermieden werden können (siehe Jakob et al, 2002, 2006, INSPIRE-

Projekt). Entsprechend gehören zum zu betrachtenden Massnahmenspektrum beispielsweise auch folgende Massnahmen:

- Soweit erforderlich Ausbesserung, Reparatur, Putzersatz etc. (d.h. keine energetische Sanierungen der Fenster und der Fassade).
- Bei der Instandsetzung der Heizung ist von einem direkten Ersatz der Heizung mit demselben Energieträger auszugehen.

Nicht betrachtete-Massnahmen

Massnahmen der Strategischen Ansatzpunkte 4 bis 6 (Definition siehe Kap. 1.4.2) sind in der Regel nicht Bestandteil des betrachteten Massnahmenspektrum, u.a. weil solche Massnahmen Gegenstand anderer Untersuchungen waren oder sind oder weil sie keine direkte Wirkung auf die direkten Emissionen haben. Massnahmen der SAP 4 bis 6 können jedoch punktuell bei einzelnen Fallstudien vorkommen.

2 Vorgehen und Methode

2.1 Methodisches Vorgehen in der Übersicht

Das Vorgehen besteht darin, die Datenbasis für das bestehende Technologie- und Massnahmenspektrum zu aktualisieren, dieses in einen nutzungsplanerischen und städtebaulichen Kontext zu stellen, konzeptionell weiterzuentwickeln und auf der Ebene des einzelnen Gebäudes und des gesamten Gebäudeparks zu bewerten. Zu diesem Zweck und zur Beantwortung der genannten Fragestellungen werden die folgenden Arbeiten durchgeführt:

1. Detailkonzept: Definition des methodischen Rahmens, der Systemgrenzen und Rahmenparameter sowie des Untersuchungsgegenstands (inkl. zu bearbeitenden Gebäudetypen).
2. Aktualisierung und Kontextualisierung der techno-ökonomischen Datenbasis von bestehenden Technologieangeboten und Herangehensweisen. Formalisierung der Kostenkennwerte gemäss transparenter und anerkannter Methodik.
3. Konzeptentwicklung von neuen technischen Low-Invest-Cost-Sanierungslösungen (Technologien und Strategien) inkl. techno-ökonomische Charakterisierung.
4. Bewertung aus Eigentümersicht, betreffend CO₂-Grenzwerten und gemäss SIA-Effizienz-pfad: Darstellung der CO₂- und Treibhausgasemissionen, End- und Primärenergie, Investitions- und Jahreskosten, generisch für verschiedene Gebäudetypen und Bauperioden und für konkrete Einzelgebäude. Die Betrachtung erfolgt für häufige Gebäudetypen (Wohnen, Büro, Schulen und für eine Siedlung gemäss den definierten Systemgrenzen (z.B. inkl. Klimakälte).
5. Bewertung auf Ebene des Gebäudeparks: Darstellen der Auswirkungen LICS-Lösungen auf die CO₂-Emissionen, den Energieverbrauch sowie auf den Investitions- und Leistungsbedarf des gesamten Schweizer Gebäudeparks bzw. der leitungsgebundenen Energieträger. Betrachtet werden die Phasen Betrieb (direkte Wirkungen und Wirkungen der vorgelagerten energetischen Prozessketten) sowie Erstellung.
6. Erarbeitung von Handlungsempfehlungen und Kommunikation der Ergebnisse

Die Projektstruktur und die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Arbeitspaketen (AP) sind in der nachfolgenden Abbildung 1 graphisch dargestellt. Bei den AP 2 und 3 geht es um die Aktualisierung und Kontextualisierung bestehender Lösungen bzw. um die konzeptionelle Entwicklung von neuen LICS-Ansätzen. Die Ergebnisse beider Module fliessen in die Bewertung auf Ebene Einzelgebäude (AP 4) und auf Ebene Gebäudepark (AP 5) ein. Aus diesen Bewertungsergebnissen werden, unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den AP 2 und 3, Handlungsempfehlungen abgeleitet und Kommunikationsmassnahmen vorbereitet.

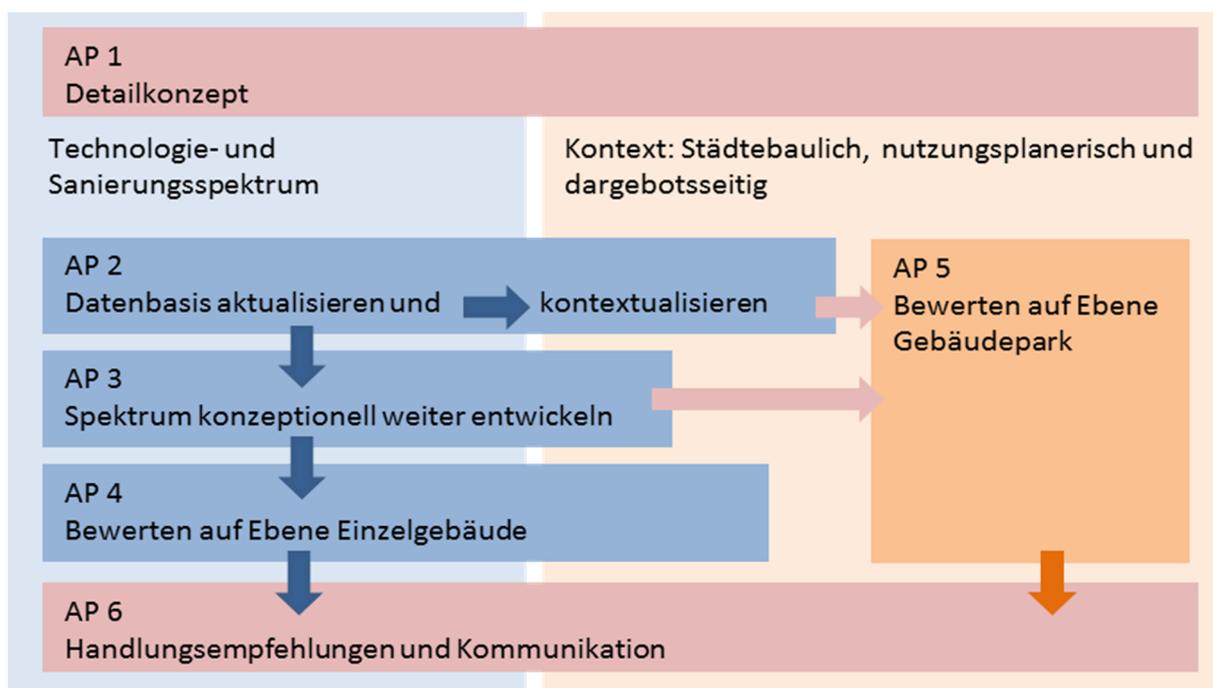


Abbildung 1 Darstellung der Projektstruktur und der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Arbeitspaketen (siehe AP1 in Kap. 0 bis 3, AP2 in Kap. 4, AP3 in Kap.5, AP4 in Kap. 6, AP5 in Kap. 7, AP6 in Kap. 8).

2.2 Basisdefinitionen und Beurteilungskriterien

Gemäss der Zielsetzung dieses Projektes sollen investitionsgünstige Ansätze für erneuerbare Energien und mehr Energieeffizienz identifiziert werden (sog. Low-Invest-Cost Solutions, LICS) mit denen ambitionierte Klima- und Energieziele erreicht werden können. Diese Ansätze sollen aus einer Einzelfall- und in einer Gebäudeparkperspektive beurteilt werden. Entsprechend wird zunächst definiert, was unter LICS und unter «ambitionierte Klima- und Energieziele» zu verstehen ist und anhand welchen weiteren Kriterien die LICS beurteilt werden.

2.2.1 Ambitionierte Klima- und Energieziele

Das vorliegende Forschungsprojekt leistet einen Beitrag zum Schwerpunkt 1 «Pragmatische Ansätze für die Bauerneuerung» der Ausschreibung «Aufruf zur Projekteingabe im Forschungsprogramm „Gebäude und Städte“» vom 19. April 2018, wobei u.a.: «Vorschläge für investitionskostengünstige Sanierungskonzepte zur Erreichung des 6 kg-CO₂-Grenzwertes mit Breitenwirkungspotenzial» gesucht werden. Dabei stellte sich auch die Frage, welche Projektwerte diese Konzepte nach der SIA 2040-Methodik erzielen. Auf diese beiden unterschiedlichen Systemgrenzen wird nachfolgend eingegangen.

6 kg-CO₂-Grenzwert (Methodik nach Kyoto-Protokoll, Scope 1)

Die Botschaft zur Totalrevision des CO₂-Gesetzes nach 2020 sah vor, dass ab 2029 ein CO₂-Grenzwert für bestehende Bauten eingeführt werden kann (Schweizerische Eidgenossenschaft, 2017). Für Wohn- und Dienstleistungsgebäude (Gebäudekategorien I bis V gemäss SIA-Norm 380/1:2016: Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser, Verwaltungsbauten, Schulen) soll der Grenzwert 6 kg-CO₂ pro Quadratmeter Energiebezugsfläche betragen, für Gewerbebauten 4 kg-CO₂.² Das entspricht gemäss der Methodik der internationalen Klimaabkommen den Emissionen, die bei der Verbrennung vor Ort ausgestossen werden (Territorialprinzip). Strom, Fernwärme und Holz werden gemäss den BAFU-Vorgaben mit null bewertet, weil deren Treibhausgasemissionen gemäss Kyoto-Protokoll und CO₂-Gesetz dem Strom-, dem Fernwärme- bzw. dem Waldsektor zugerechnet werden (BAFU-Faktenblatt, (Gross, 2018)). Dies betrifft namentlich auch die Fernwärme, deren Emissionen gemäss Vorschlag des Bundesrats auch nach 2020 dem Ort der Erzeugung, also dem Fernwärme-sektor zuzuordnen sind. Als Abgrenzung zur Nahwärme wird eine Leitungslänge von 5 km vorgeschlagen (Bundesrat, 2019).

Die Emissionen, die mit dem 6 kg-CO₂-Grenzwert verglichen werden, werden mit den CO₂-Emissionsfaktoren der linken Seite von Tabelle 3 berechnet (Spalten mit «CO₂-Gesetz» beschriftet). Zum Vergleich sind auch die Emissionsfaktoren des SIA-Effizienzpfad (SIA 2040:2017, (KBOB, 2014)) dargestellt, welche auch die Emissionen der vorgelagerten Ketten sowie neben CO₂ auch alle anderen Treibhausgase umfassen.

Tabelle 3 Treibhausgas-Emissionsfaktoren (kg CO₂eq/kWh) gemäss Schweizer CO₂-Gesetz (BAFU Faktenblatt 2018) und gemäss SIA-Effizienzpfad (SIA 2040:2017, KBOB 2014)

Energieträger	CO ₂ Gesetz		SIA 2040:2017 (KBOB 2014)
	Unterer Heizwert	Oberer Heizwert	Oberer Heizwert
Heizöl	0,265	0,250	0,298
Erdgas	0,203	0,183	0,228
Holzpellets	0	0	0,034
Biogas	0	0	0,132
Elektrizität	0	0	0,139
Fernwärme	0	0	0,089

Quelle BAFU Faktenblatt 2018, (SIA 2040:2017, KBOB (2014), Bundesamt für Umwelt (2019), Umrechnungen TEP Energy / LTL)

² Zur Herleitung gemäss Botschaft wurde auf die Mustervorschriften der Kantone im Gebäudebereich, MuKE 2014, Art. 1-23 abgestützt, wobei der Emissionsfaktor für Erdgas von 201.96 kg CO₂/MWh verwendet wurde. Zitat aus der Botschaft Dabei wurde die (nahezu CO₂-freie) Elektrizität für die Lüftung und Klimatisierung abgezogen und der Energiebedarf für die Warmwasseraufbereitung und die Heizung mit dem Emissionsfaktor für Erdgas (201,96 kg CO₂/MWh) verrechnet und gerundet.

Die sog. Graue Energie der eingebauten Komponenten sowie die Emissionen der vorge-lagerten Ketten der Endenergieerzeugung werden beim 6 kg-Grenzwert, der sich auf die Methodik nach Kyoto-Protokoll und CO₂-Gesetz bezieht, nicht berücksichtigt. Solche Emissionen aus Scope 2 und 3 sind jedoch bei einzelnen Entscheidungen aus Eigentümer oder Investorensicht wichtig. Sie werden z.B. bei der Methodik gemäss SIA 2040 (SIA-Effizienz-pfad) berücksichtigt, worauf nachfolgend eingegangen wird.

SIA 2040-Methodik (Scope 2 und 3)

Der SIA Effizienzpfad-Energie (SIA 2040:2017) definiert einen Richtwert für den Betrieb eines Bestandsgebäudes von 5 kg CO₂-Äquivalenten pro Quadratmeter Energiebezugsfläche. Im Gegensatz zur Berechnungsmethodik nach Kyoto-Protokoll stützt sich der SIA Effizienzpfad-Energie jedoch auf das Bilanzierungskonzept der 2000-Watt-Gesellschaft. Es werden nicht nur die vor Ort emittierten CO₂-Äquivalente berücksichtigt, sondern auch die Emissionen aus vorgelagerten Prozessen, die zur Bereitstellung des Energieträgers notwendig waren, inkl. Förderung, Umwandlung und Transport. Zudem werden die Emissionen aus der Versorgung des Gebäudes dem Gebäude angelastet. Deshalb werden auch die Endenergeträger Strom, Fernwärme und Holz mit entsprechenden Faktoren berücksichtigt (Tabelle 4).

SIA 2040:2017 stützt sich dabei auf die Emissionswerte nach KBOB Stand 2014 (KBOB, 2014). Alternativ oder ergänzend im Rahmen von Sensitivitätsanalysen wird auch der neuere Stand des KBOB-Merkblatts von 2016 berücksichtigt, der insbesondere bei Biogas zu Unterschieden führt.

Tabelle 4 Emissionsfaktoren gemäss SIA 2040:2017 (KBOB, 2014): Emissionen inkl. vorge-lagerte Prozesse, d.h. inkl. Aufbereitung und Transport, jedoch ohne Anteil an Anlage

Energieträger	Emissionsfaktor CO ₂ -eq kg/kWh	PEF	
		gesamt MJ oil-eq	nicht- erneuerbar MJ oil-eq
Heizöl extraleicht	0,298	1,23	1,22
Erdgas	0,228	1,07	1,06
Biogas	0,132	0,338	0,308
Fernwärme mit Nutzung Kehrriech (Durchschnitt CH)	0,089	0,712	0,451
Schnitzel mit Partikelfilter	0,011	1,15	0,0664
Pellet (ohne Filter)	0,034	1,21	0,197
Strom (Schweizer Verbrauchermix)	0,139	3,14	2,69
Strom erneuerbar (Mix zertifizierte Stromprodukte CH)	0,014	1,21	0,0339
Eigener PV-Strom	0,080	1,42	0,298

Quelle: SIA 2040:2017 (KBOB, 2014)

Bei der Beurteilung nach SIA 2040-Methodik werden auch die graue Energie und die grauen Treibhausemissionen im Richtwert für die Phase „Erstellung“ berücksichtigt. Letzterer beträgt für Umbauten ebenfalls 5 kg CO₂-Äquivalente pro Quadratmeter Energiebezugsfläche. Zur Ermittlung der Emissionen aus der Erstellung werden ebenfalls die Emissionsfaktoren der KBOB (2014) bzw. KBOB (2016) verwendet.³

Bei der Bewertung nach SIA Effizienzpfad-Energie wird im Projekt zusätzlich zu den CO₂-Emissionen die nicht-erneuerbare Primärenergie für den Betrieb und die Erstellung (bauliche Massnahmen im Rahmen des Sanierungspakets) berechnet und den diesbezüglichen Richtwerten gegenübergestellt (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5 Richtwerte «Umbau» für die Kategorien Wohnen, Verwaltung und Schulen gemäss SIA 2040:2017

Energieträger	THG-Emissionen CO ₂ -eq kg/m ²			PEF nicht-erneuerbar kWh/m ²		
	Wohnen	Verwaltung	Schulen	Wohnen	Verwaltung	Schulen
Betrieb	5,0	6,0	5,0	20	20	20
Erstellung	5,0	6,0	5,0	70	100	70
Zusatzanforderung Betrieb und Erstellung	10,0	12,0	10,0	90	120	90

Quelle : SIA 2040 :2017 (inkl. Corrigenda C1)

Fazit

Die Basisbetrachtung der Massnahmen erfolgt auf den Vorgaben des schweizerischen CO₂-Gesetzes (Kyoto, Scope 1). In Sensitivitätsanalysen erfolgt auch eine Bewertung gemäss SIA 2040:2017 (KBOB, 2014). Die dazu verwendeten Emissionsfaktoren sind zusammenfassend in Tabelle 3 dargestellt. Bei den Berechnungen ist jeweils zu beachten, auf welchen Wert sich die Emissionsfaktoren beziehen (Heizwert, früher als unterer Heizwert bezeichnet bzw. Brennwert, früher als oberer Heizwert bezeichnet).

2.2.2 Definition Low Invest Cost

Low-Invest-Cost-Sanierungslösungen (LICS) sind Massnahmenkombinationen mit tiefen Investitionskosten. Eine allgemein anerkannte Definition, was «tiefe Investitionskosten» sind, gibt es nicht und auch die Ausschreibung des Forschungsprogramms definiert tiefe Investitionskosten nicht explizit. Es wird jedoch die Frage gestellt, mit welchen Konzepten das Ziel von 6 kg CO₂ pro m² EBF auch ohne Fassadendämmung erreicht werden kann. Auf Grund der Erfahrung, dass Fassadendämmungen u. a. wegen ihren hohen Investitionskosten durch

³ Die Richtwerte für die Phasen und „Betrieb“ und „Erstellung“ wurden auf der Grundlage der KBOB (2014) berechnet. In der Ausgabe 2016 wurden die die Emissions- und Primärenergiefaktoren von vielen Energieträgern und Materialien aktualisiert und aus inhaltlichen Gründen ist die Version 2016 deshalb vorzuziehen (auch wenn die direkte Vergleichbarkeit mit den Richtwerten damit nicht mehr vollständig gegeben ist).

private Eigentümerschaften nur selten umgesetzt werden, geht auch das Projektteam davon aus, dass Low-Invest-Cost Massnahmenkombinationen in der Regel **keine** Fassadendämmungen enthalten werden.

Vor diesem Hintergrund und mit Verweis auf den Umstand, dass Kosten je nach Ausgangslage und Situation sehr stark unterschiedlich sein können, streben wir keine präzise Definition im Sinn von «weniger als x CHF / m²» an. Grundsätzlich geht es um Massnahmen, mit denen die angestrebten klima- und energiepolitischen Ziele mit vergleichsweise tiefen initialen Investitionskosten erreicht werden. Das sind Massnahmenbündel, bei denen nicht notwendigerweise die absolut minimalen Lebenszykluskosten, sondern möglichst oder vergleichsweise tiefe Investitionskosten zur Zielerreichung anvisiert werden. Damit soll ein zentrales Hemmnis der typischerweise erhöhten Investitionsaufwendungen für klima- und energiepolitische Massnahmen verringert werden.

Erfahrungswerte aus dem Team zeigen, dass bei Erneuerungspaketen, die umfassende Gebäudehüllenerneuerungen enthalten, mit Investitionskosten im Bereich von CHF 1'000 bis 1'500 pro Quadratmeter EBF zu rechnen ist (in diesem Bereich sind allerdings nicht nur Gebäudehüllenmassnahmen enthalten, sondern auch weitere Sanierungsmassnahmen bei der Gebäudetechnik und/oder in den Innenräumen). Wenn nur Gebäudehülle plus Gebäudetechnik betrachtet werden, liegen die Kosten von umfassenden Gesamterneuerungen etwa bei 700 bis 900 CHF/m². Wir gehen im Sinne einer Arbeitshypothese davon aus, dass es mit Low-Invest-Cost-Lösungen möglich sein sollte, ein 6 kg-CO₂-Wohngebäude für ein Drittel oder ein Viertel dieser Kosten zu erreichen. Diese Hypothese wird anhand der Fallstudien überprüft (siehe Kap. 6).

2.2.3 Kriterien zur Beurteilung der Low Invest Cost Solutions

Die Massnahmen- und Massnahmenbündel der Low-Cost-Sanierungslösungen werden anhand einer überschaubaren Anzahl Beurteilungskriterien der folgenden 3 Dimensionen bewertet.

- Treibhausgasemissionen: direkte und indirekte CO₂-eq Emissionen
- Energie: spez. Nicht-erneuerbare Primärenergie und max. Leistungsbedarf
- Wirtschaftlichkeit: spez. Investitions- und Lebenszykluskosten pro m² EBF

Für die verschiedenen Fälle werden der Transparenz und Nachvollziehbarkeit halber je nach Bedarf weitere Berechnungsparameter dargestellt, siehe Tabelle 6.

Tabelle 6 Beurteilungskriterien und mögliche Ergebnisparameter

	Beurteilungskriterium	Einheiten^(*)
CO ₂	Jährliche ^(*) CO ₂ -Emissionen der eingesetzten Endenergieträger nach Definition Kyoto-Protokoll bzw. CO ₂ -Gesetz	kgCO ₂ /m ²
CO ₂	Jährliche ^(*) CO ₂ -Emissionen Betrieb nach SIA-2040-Methodik	kgCO ₂ eq/m ²
Energie	Jährlicher ^(*) nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf Betrieb nach SIA-2040-Methodik	kWh/m ²
Leistung	Max. Leistungsbedarf pro m ² EBF	W/m ²
Leistung	Max. Leistungsbedarf leitungsgebundene Energieträger (Elektrizität, FW oder Gas)	W/m ²
Kosten	Investitionsausgaben pro m ² EBF	CHF/m ²
Kosten	Jährliche ^(*) Lebenszykluskosten des Massnahmenbündels pro m ²	CHF/m ²
Einzuhaltende Nebenbedingung		
Temperatur	Einhaltung von durchschnittlich 22° in allen Wohnräumen während der Heizperiode	°C
Weitere Berechnungsergebnisse		
Energie	Jährliche ^(*) Graue Treibhausgasemissionen der Erneuerungsmassnahmen nach SIA-2040-Methodik (Phase Erstellung)	kgCO ₂ eq/m ²
Energie	Jährliche ^(*) Graue Energie der Erneuerungsmassnahmen nach SIA-Methodik (Phase Erstellung)	kWh/m ²
Energie	Jährlicher ^(*) Endenergieverbrauch Gebäude total pro Energieträger	kWh
Energie	Falls zutreffend: Netto-Endenergieverbrauch (nach Abzug erneuerbarer On-Site-Produktion) pro Energieträger (Jahres- und Halbjahresbilanz)	kWh
Kosten	Investitionsausgaben total	CHF
Kosten	Auf die Mietenden überwälzbarer Teil der Investitionsausgaben (ggf. umgerechnet auf Jahres- oder Monatskosten)	% oder CHF/m ²
Kosten	Investitionsausgaben pro m ² EBF nach Abzug der Überwälzung	CHF/m ²

Weitere Informationen zu den Massnahmenkombinationen:

Jährlicher ^(*) Energiebedarf Gebäude nach SIA 380/1	kWh/m ²
Erforderliche Heizleistung	kW
Erforderliche Anschlussleistung (Stromanschluss für WP, Fernwärme, Gas etc.)	kW
Vorlauftemperatur neu	°C
On-Site-Stromproduktion	kWh/a
Netzbezugsspitze	kW
Einspeisespitze	kW

(*) Bei jährlichen Grössen (Energie, Kosten, Emissionen) wird bei den Einheiten in der Regel der leichteren Lesbarkeit halber auf den Zusatz «a» oder «/a» o.ä. verzichtet (so wie in den aktuellen Versionen der SIA Normen, beispielsweise SIA 380/1)

Quelle: Projekt LICS

Die Energie-, Leistungs- und Wirtschaftlichkeitsberechnungen werden bei der Einzelgebäudebetrachtung grundsätzlich mit dem INSPIRE Tool berechnet (Jakob, Ott, et al., 2014), wobei bei Bedarf gewisse Berechnungsverfahren angepasst werden. Damit sollen der sog. Energy Performance Gap (EPG) berücksichtigt werden und bei der Leistungsberechnung das alternative Verfahren zu Anwendung kommen können.

Bei der Gebäudeparkbetrachtung wird das Gebäudeparkmodell (GPM) von TEP Energy eingesetzt. Dieses enthält im Grundsatz ähnliche Funktionalitäten wie das INSPIRE Tool, z.B. eine vereinfachte SIA 380/1-Berechnung, eine Investitions- und eine Lebenszykluskostenberechnung sowie eine Berechnung der Emissionen und der Primärenergie gemäss SIA 2040.

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird auf die verwendeten Berechnungsmethoden und Berechnungstools sowie die allgemeinen Faktoren für die Berechnungen der o.g. Ergebnisparameter eingegangen. Dies beinhaltet die Energie- und Leistungs- sowie die Wirtschaftlichkeitsberechnungen und die wichtigsten Annahmen wie Energiepreise und Nutzungsgrade der präsentierten Wärmeerzeuger. Zudem wird eine kurze Erläuterung über den Umgang mit dem „Energy Performance Gap“ gegeben.

2.3 Energie- und Leistungsberechnungen

Die Energie- und Leistungsberechnungen basieren zum einen auf anerkannten Methoden des SIA und zum anderen auf der Literatur zum Energy Performance Gap (siehe Jakob et al., 2021 für eine Übersicht) und auf Erfahrungswerte der Autoren dieses Berichts. Während der Berechnungsgang bei ersterem grundsätzlich vom Bedarf (Nutzenergie) in Richtung Verbrauch (Endenergie) erfolgt, kann zum Einbezug des letzteren auch vom Verbrauch ausgegangen werden.

2.3.1 Nutzenergie inkl. Berücksichtigung des Energy Performance Gap

Die Nutzenergie (NE) wird gemäss der Norm SIA 380/1 berechnet, und zwar separat für Raumwärme (Q_H) und Warmwasser (Q_W).

Der Heizwärmebedarf Q_H wird mit einem Monatsbilanzverfahren berechnet und hängt von den thermischen Verlusten und den internen und externen Wärmegewinnen ab:

- Transmissionsverluste und -gewinne durch die Gebäudehülle (U-Werte, g-Werte, Flächen der Bauteile A_i der Gebäudehülle)
- thermische Lüftungsverluste Q_V
- externe Wärmegewinne Q_S (Solarstrahlung, unter Berücksichtigung von Beschattung und Sonnenschutz Einsatz)
- interne Wärmegewinne Q_i durch Personen und Geräte
- Ausnutzungsgrad der thermischen Gewinne η_g

Der Jahreswert ergibt sich durch Aufsummieren der einzeln berechneten Monatswerte über alle 12 Monate M des Jahres:

$$Q_H = \sum_M [Q_V + Q_T - \eta_g \cdot (Q_i + Q_s)]$$

Der Wärmebedarf für Warmwasser (Q_W) ergibt sich aus den Standardnutzungswerten gemäss SIA 380/1 (Tabelle 27). Zur Berücksichtigung des Energy Performance Gaps können die Werte mit der effektiven Personenbelegung skaliert werden.

Die Berechnungsparameter können von der Norm abweichend angepasst werden, um eine bessere Übereinstimmung zwischen Berechnung (der Endenergie, siehe nächste Kap.) und Verbrauch zu erzielen. Damit wird der sogenannte Energy Performance Gap (EPG) berücksichtigt.

Berücksichtigung EPG

In einem ersten Schritt werden die in 6.1 erhobenen Objektdaten in das INSPIRE Tool übertragen und um den Energy Performance Gap korrigiert. Dafür werden die im GAPxPLORE Bericht (Cozza et al., 2019) und PRO380 Bericht (Hoffmann et al. 2017) erarbeiteten Erkenntnisse auf die Objektdaten angewendet.

Der EPG wurde je nach Objekt mit den folgenden Ansatzpunkten (im Sinne einer Auswahl) berücksichtigt:

- Anpassung des b-Wertes der Kellerdecke
 - b-Wert von 0.8 auf 0.5
- Anpassung der U-Werte der Fassaden
 - Max. Fassaden U-Werten auf 1.2 W/m²K setzen

- Anpassung der Innenraumtemperatur⁴
 - Vor energetischer Erneuerung: In EFH Reduktion von T_{innen} um 1 K, begründet durch die Annahme, dass Schlaf- und andere Räume bei geringer Nutzung nicht auf 20°C beheizt werden.
 - Nach der Massnahme: T_{innen} 22°C: Die höhere Temperatur nach der energetischen Erneuerung zweifach zu begründen: bauphysikalisch (vormals eher kühlere Räume wie z.B. Schlafräume mit tiefer eingestellter Solltemperatur bleiben nach der Wärmedämmung der Aussenhülle insgesamt wärmer) und gebäudetechnisch (die Heizung „liefert“ mehr Energie als vorher, u.a. weil die Heizkurve in der Praxis nach der Wärmedämmung nicht angepasst wird).
- Reduktion Luftwechsel: Rund 70% der Fenster wurden i.d.R. in den letzten 30 Jahren gewechselt, wie die Erhebungen von TEP Energy in 19 Kantonen zeigen (M. Jakob et al., 2021). Je nach Fall wurde die Luftwechselrate angepasst.
- Fenster-U-Werte auf max. 2.0 setzen (je nach Bau- und Erneuerungsperiode tiefer, siehe auch Jakob et al. 2021 und Erhebungen ETH Zürich (Schmid, Haelg, Sewerin, Schmidt, & Simmen, 2021)

Entsprechende Korrekturen werden fallspezifisch schrittweise vorgenommen, v.a. wenn der Energieverbrauch bekannt ist.

2.3.2 Nutzungsgrade Wärmeerzeuger zur Umrechnung in Endenergie

Im Gebäudebestand werden häufig Vorlauftemperaturen von 60 bis 65°C angetroffen. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Vorlauftemperatur der untersuchten Gebäude auch ohne zusätzliche umfassende Wärmedämmungen an der Gebäudehülle auf 55° Celsius beschränkt werden kann. Erreicht wird dies durch spezifische Massnahmen, siehe Kap. 5.3. Daraus ergeben sich die in Tabelle 7 dargestellten JAZs für die Luft/Wasser und Erdsonden-Wärmepumpe (dies sind eher konservative Annahmen). Diese gelten grundsätzlich auch bei bivalenten Anlagen, wenn die WP den Hauptteil und die Spitzenlast einen geringen energetischen Beitrag abdeckt (z.B. rund 10%). Bei einem höheren energetischen Anteil von beispielsweise 25% bis 35% gemäss MuKE könnten die JAZ der WP etwas höher liegen.

Tabelle 7: JAZ der verschiedenen WP bei einer Vorlauftemperatur im Auslegungspunkt von 55°C

	JAZ Raumwärme	JAZ Warmwasseraufbereitung
Bivalente Luft/Wasser-Wärmepumpe	2.8	2.7
Split Luft/Wasser-Wärmepumpe	2.8	2.7
Erdsonden-Wärmepumpe	3.3	2.8

Quelle: Projekt LICS

⁴ Eine Literaturstudie zu den Ursachen des EPG in Altbauten, inkl. Einfluss der Innenraumtemperatur, ist im PRO380 Bericht (Hoffmann et al. 2017) zu finden.

Die Nutzungsgrade der restlichen Wärmeerzeuger werden in der folgenden Tabelle 8 definiert (die Werte beziehen sich auf den unteren Heizwert, so wie in der Gesamtenergiestatistik des BFE und wie bei den Tools und Umsetzungshilfen von Minergie und Kantonen). Es ist zu beachten, dass die präsentierten Nutzungsgrade zwar für moderne Produkte stehen, sie aber im Bestand häufig mit VL-Temperaturen von 55°C (im Auslegungsfall) und entsprechenden noch höheren Abgastemperaturen konfrontiert sind und nur zu geringen Teilen kondensieren. Höhere Kondensierungsanteile und damit höhere JNG können durch spezielle Massnahmen erzielt werden, indem die Zuluft für den Kondensationswärmetauscher verwendet wird.

Tabelle 8 Nutzungsgrade der betrachteten Wärmeerzeuger bei einer Vorlauftemperatur von 55° Celsius), bezogen auf den unteren Heizwert.

Wärmeerzeuger	Gasheizung	Ölheizung	Pellets	Fernwärme
Raumwärme (RW)	0.92	0.85	0.80	0.95
Warmwasser (ganzjährig in Kombination mit RW)	0.75	0.75	0.7	0.85

Für den bivalenten Fall werden dieselben Annahmen verwendet, weil davon ausgegangen wird, dass sich gewisse Effekte ausmitteln (Anlage läuft mehr «am Stück», aber Vorlauf-Temperatur ist gewichtet höher).

2.3.3 Leistungsberechnung

Die Leistung eines Wärmeerzeugers wird grundsätzlich nach SIA 384/1 bemessen. Dabei stehen zwei unterschiedliche Verfahren zur Auswahl:

- **Norm-Heizlast:** Bei Neubauten und Umbauten sind meist ausreichend Informationen über die Qualität der Aussenbauteile vorhanden, um die Wärmeverluste über Gebäudehülle und Luftaustausch zu ermitteln. Der Wärmeleistungsbedarf des Gebäudes kann dann aus der Norm-Heizlast gemäss SIA 384/2 plus Leistungszuschlägen für Warmwasser, WP-Sperrzeiten und für weitere Wärmebezüge berechnet werden.
- **Vollaststundenverfahren:** Bei bestehenden Gebäuden kann der Heizleistungsbedarf alternativ auch anhand des gemessenen Brennstoffverbrauchs abgeschätzt werden (Vollaststundenverfahren). Je nach Höhe des aus den Brennstoffverbrauchsdaten abgeleiteten Heizwärmebedarfs resultieren bei diesem Verfahren jährliche Vollaststunden von bis zu knapp 3'200 h, was wiederum zu einem verhältnismässig tiefen Heizleistungsbedarf führt (Abbildung 10). Bei den meisten Gebäuden liegt der anhand der Norm-Heizlast berechnete Heizleistungsbedarf deutlich höher (ca. +20 bis +35%), als bei Abschätzung anhand von Brennstoffverbrauchsdaten.

Tabelle 9: Spezifische Leistung (W/m²) gemäss prSIA 384/1 und resultierende Volllaststunden für Verbräuche zwischen 30 und 150 kWh/m², je für die 90%-Kennlinie und für die 50%-Kennlinie für den Standort Zürich (gemäss prSIA 384/1, Anhang C)⁵

	90%-Kennlinie				50%-Kennlinie			
Aussentemperatur	-8	-8	-12	-12	-8	-8	-12	-12
Innentemperatur	20	22	20	22	20	22	20	22
Verbrauch (kWh/m ²)	Wärmeleistungsbedarf (W/m ²)							
30	24	25	27	29	20	22	23	24
60	34	36	38	41	27	29	31	33
90	44	47	50	53	34	36	38	41
120	54	58	61	65	40	43	46	49
150	64	68	73	78	47	50	54	57
Verbrauch (kWh/m ²)	Resultierende Volllaststunden							
30	1276	1190	1116	1050	1488	1389	1302	1225
60	1786	1667	1563	1471	2232	2083	1953	1838
90	2060	1923	1803	1697	2679	2500	2344	2206
120	2232	2083	1953	1838	2976	2778	2604	2451
150	2350	2193	2056	1935	3189	2976	2790	2626

Quelle: Berechnungen TEP basierend auf prSIA 384/1



Abbildung 2 Verfahren zur Abschätzung des Wärmeleistungsbedarfs gemäss prSIA 384/1

Messungen bestätigen die tendenzielle Überschätzung des Wärmeleistungsbedarfs von Altbauten mit der Normheizlast-Methode. Illustriert werden kann dies anhand der Fallstudie 11 (MFH Höggerstr. 142): hier liegt die Normheizlast (inkl. Warmwasser) bei 43 kW, der anhand

⁵ Die Kennlinien wurden empirisch anhand einer Auswertung einer grossen Anzahl von GEAK-Daten bestimmt. 90% bedeutet, dass 10% der Beobachtungen über der Kennlinie liegen, 50% bezieht sich auf den Median.

des Brennstoffverbrauchs gemäss prSIA 384/1 mit der 50%-Kennlinie ermittelte Leistungsbedarf liegt bei 31 kW und der anhand der gemessenen Leistungskennlinie ermittelte Leistungsbedarf liegt bei 25 kW, also bei 60% der Normheizlast.

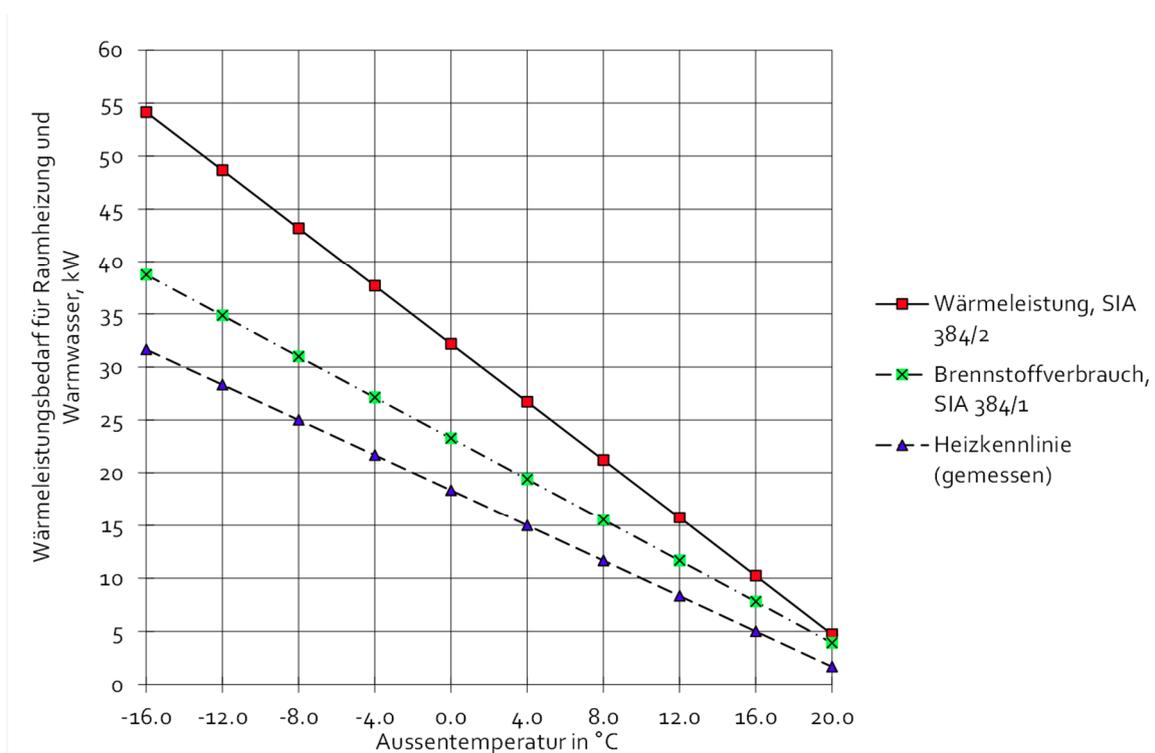


Abbildung 3 Wärmeleistungsbedarf ermittelt mit unterschiedlichen Verfahren für die Fallstudie 11, Auslegungstemperaturen: aussen -8°C, innen 21°C

In der vorliegenden Studie wird die Wärmeerzeugerleistung der Fallbeispiele in der Regel anhand des gemessenen Brennstoffverbrauchs ermittelt.

Bei Wärmepumpen nimmt die Wärmeerzeugerleistung mit zunehmender Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmeabgabe ab. Die Festlegung von für den Heizungsersatz typischen Auslegungsbedingungen ist daher entscheidend. Für die vorliegende Studie werden folgende Auslegungsbedingungen angenommen:

- Luftwärmepumpe: L-8/W55
- Wärmepumpe mit Erdwärmesonden: So/W55

2.4 Wirtschaftlichkeitsrechnungen

In diesem Kapitel wird auf die wichtigsten Aspekte und Annahmen in Bezug auf die durchgeführten Wirtschaftlichkeitsrechnungen eingegangen.

2.4.1 Methodik: LZK, INSPIRE-Tool

Die ökonomischen Aspekte der energetischen Massnahmen werden zum einen in Bezug auf die Investitionskosten und zum anderen mittels des Parameters der Lebenszykluskosten (LZK) beurteilt. Letztere setzen sich aus den Kapitalkosten (Abschreibung der Investition und Verzinsung), den Betriebs- und Unterhaltskosten sowie den Energiekosten zusammen. Die Kapitalkosten werden mittels der Annuitätenmethode gemäss SIA 480 ausgehend von den Investitionen berechnet (siehe Kap. 2.4.2 für die wichtigsten Annahmen).

Bestandteil von LZK sind auch Demontage- und Entsorgungskosten. In diesem Projekt werden entsprechende Kosten beim Einbau bilanziert, d.h. es wird ein Anpassungs- und Umstellungsfokus eingenommen. In diesem Sinn werden die Demontage und die Entsorgung des zu erneuernden oder zu ersetzenden Bauteils oder der Anlage berücksichtigt. Da solche Kosten zum selben Zeitpunkt wie die Investitionskosten der betrachteten Massnahmen anfallen, werden sie zusammen mit diesen in derselben Hauptkategorie bilanziert.

Bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von einzelnen energetischen Massnahmen, Massnahmenbündeln und Erneuerungspaketen hat die Vergleichsbasis einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis (M Jakob et al., 2010). Deshalb werden gemäss INSPIRE Projekt und INPSIRE Tool die folgenden zwei Referenzfälle eingeführt:

- Referenzfall 1 (Ref 1): Im Referenzfall 1 wird das Heizsystem ohne Systemwechsel ersetzt
- Referenzfall 2 (Ref 2): Ersatz des Heizsystems ohne Systemwechsel in Kombination mit einer Fensterinstandsetzung ohne energetische Verbesserung.

2.4.2 Annahmen zur Berechnung der Kapitalkosten

Zur Berücksichtigung der Annuität wird bei den einzelwirtschaftlichen Betrachtungen von einem Realzins von 3% ausgegangen. Dies ergibt je nach wirtschaftlicher Lebensdauer einen Annuitätenfaktor von 8.4% pro Jahr (15 Jahre) bis 3.9 % pro Jahr (50 Jahre).

Tabelle 10 Annuitätentabelle

	0.1%	2%	3%	5%
15 Jahre	6.7%	7.8%	8.4%	9.6%
20 Jahre	5.1%	6.1%	6.7%	8.0%
25 Jahre	4.1%	5.1%	5.7%	7.1%
30 Jahre	3.4%	4.5%	5.1%	6.5%
40 Jahre	2.6%	3.7%	4.3%	5.8%
50 Jahre	2.1%	3.2%	3.9%	5.5%

Quelle: Berechnungen TEP Energy

2.4.3 Annahmen Endenergiepreise

Die dazu verwendeten Energiepreise sind in Tabelle 11 dargestellt und werden aus einer Studie von INFRAS und TEP Energy zu den Auswirkungen eines subsidiären Verbots fossiler Heizungen abgeleitet (Iten et al., 2017). Bei den leitungsgebundenen Energieträgern sind darin die Netzgebühren und leistungsabhängige Preiskomponenten mit eingerechnet (auf die kWh umgerechnet). Allfällige Hausanschlusskosten oder einmalige Anschlussgebühren sind jedoch nicht enthalten, da diese sehr unterschiedlich ausfallen können und sie deshalb nicht pauschal, sondern bei den Investitionskosten mit der Methodik der Kostenstufen berücksichtigt werden.

Tabelle 11 Angenommene Energiepreise ausgehend von einer CO₂-Abgabe von 96 CHF/tCO₂

Energieträger	Erdöl	Erdgas	Biogas	Strom	Holz Pellets	Fernwärme
Rp. /kWh	12.0	9.0	17.0	23.7	9.0	8.8

Quelle: Iten et al., 2017

Die in Tabelle 11 dargestellten Gaspreise gelten bei einer CO₂-Abgabe von 96 CHF/t, bei einer CO₂-Abgabe von 210 CHF/t wird beim Erdgas mit einem Zuschlag von 2.3 Rp/kWh (bezogen auf den unteren Heizwert) und beim Erdöl mit einem solchen von 3.0 Rp/kWh gerechnet.

Anzumerken ist, dass Energiepreise besonders seit 2022 stark volatil sind und sich generell auf einem höheren Niveau befinden als in Tabelle 11, wenn auch in unterschiedlichem Ausmass. Aus der Situation 2022 kann jedoch nicht direkt auf die künftigen Energiepreise geschlossen werden und es ist davon auszugehen, dass sich die Märkte bis zu einem gewissen Mass wieder stabilisieren und sich wieder auf einem tieferen Preisniveau einpendeln (wenn auch möglicherweise etwas höher als in Tabelle 11 angegeben). Wir gehen deshalb davon aus, dass die Schlussfolgerungen, die sich aus den Wirtschaftlichkeitsberechnungen ergeben, ihre grundsätzliche Gültigkeit behalten.

2.5 Fazit: zu erhebende Daten und Gebäudeparameter

Die zu erhebenden Gebäudeparameter orientieren sich an den Aussagen, die für verschiedene LICs-Erneuerungsszenarien anvisiert werden. Seitens der energetischen und emissionsbezogenen Parameter müssen die notwendigen Grössen erhoben werden, um beurteilen zu können, ob nach der Erneuerung der Zielwert von höchstens 6kg CO₂ Emissionen pro m² EBF sowie die SIA 2040 Richtwerte erreicht oder unterschritten werden.

Zur Herleitung von baulich-gebäudetechnischen Lösungen zur Zielerreichung werden die Gebäudedimensionen sowie die im Hinblick auf die energetischen Erneuerungsszenarien wichtigen Informationen zum Zustand und zur baulich-energetischen Qualität der zu sanierenden Gebäudeelemente benötigt.

In Tabelle 12 sind die für die Fallstudien zu erhebenden energieverbrauchs- und massnahmenrelevanten Gebäudeparameter dargestellt. Ein Teil dieser Daten kann remote mittels GIS-Methoden und –quellen sowie mittels Registerdaten erfasst werden. Die übrigen Daten sind für die Fallbeispiele bei den Eigentümerschaften zu erheben, ggf. mit Unterstützung von Energieberatern.

Tabelle 12 Zu erhebende Objektdaten

Kat.	Notwendige Parameter	Mögliche Quelle
Gebäude	Gebäudetyp (EFH, MFH)	GWR
Gebäude	Gebäude freistehend, ein-, zweiseitig angebaut.	GWR, Amtliche Vermessung
Gebäude	Baujahr oder Bauperiode	GWR
Gebäude	Energiebezugsfläche	GWR (Wohnfläche)
Gebäude	Gebäudegrundfläche	Amtliche Vermessung
Gebäude	Anzahl Geschosse (total, überirdisch, beheizt)	GWR, Eigentümer
Situation	Nachbarschaftssituation und Bebauungsdichte	Amtliche Vermessung/Zonenplan
Situation	Verfügbarkeit Energieträger vor Ort (insb. Wärmenetze, Sondenbohrung möglich (?), Gasnetz)	Website Energieversorger, Kommunale und/oder kantonale Energieplanung,
Dachraum	Ausgebaut, ausbaubar, aufstockbar (jeweils als Anteil, jeweils aus bautechnischer und baurechtlicher Sicht)	Eigentümer, 3D-Modell von Swisstopo, Zonenplan
Dach	Art des Daches: Giebedach, Pultdach mit Richtung, Flachdach, Dachfenster (Ausrichtung, Fläche), Gauben/Lukarnen	3D-Modell von Swisstopo, Google Earth
Dach	Dachflächen [m ²] mit Neigung und Ausrichtung sowie jeweilige Flächenanteile, die für PV-Einsatz geeignet sind	3D-Modell von Swisstopo, Google Earth
Dach	Dämmung Dach: nein/ja, Zeitpunkt -> U-Wert oder Material und Dicke	Eigentümer Energieberater
Dach	Zeitpunkt der letzten Instandsetzung/Erneuerung Zustand und Erneuerungsbedarf	Eigentümer Energieberater
Estrich	Fläche Estrichboden (falls Dämmperimeter)	Eigentümer, subsidiär Energieberater
Estrich	Dämmung Estrichboden: nein/ja, Zeitpunkt -> U-Wert oder Material und Dicke	Eigentümer, Energieberater
Estrich	Anteil, der gedämmt werden könnte	Eigentümer, subsidiär Energieberater
Fassade	Fläche pro Seite inkl. Ausrichtung	3D-Modell von Swisstopo, Google Earth
Fassade	Dämmung Fassade: ja/nein, Zeitpunkt U-Wert oder Material und Dicke	Eigentümer Energieberater
Fassade	Zeitpunkt der letzten Instandsetzung/Erneuerung, Zustand und Erneuerungsbedarf	Eigentümer, Energieberater

Fenster	Anzahl und Fläche pro Ausrichtungsseite	Eigentümer, subsidiär EB, Google Earth
Fenster	Fensterqualität, Anteile pro Ausrichtungsseite: Zeitpunkt Einbau bzw. Ersatz, U-Werte	Eigentümer, Energieberater
Fenster	Zeitpunkt der letzten Instandsetzung/Erneuerung, Zustand und Erneuerungsbedarf	Eigentümer Energieberater
Keller	Kellerdeckenfläche (gesamt, Dämmperimeter, dämmbarer Anteil)	Eigentümer, subsidiär Energieberater
Keller	Dämmung: Zeitpunkt, evtl. Dämmstärke, U-Wert Kellerdecke	Eigentümer, Energieberater
Technik	Energieverbrauch Heizung und Warmwasser (vor Erneuerung) [kWh, Liter, m ³ etc., kWh/m ² a]	Eigentümer, EVU, subsidiär Energieberater
Technik	Art bestehendes Heizungs-/WW-System	Eigentümer, subsidiär Energieberater
Technik	Art der Wärmeverteilung (Radiatoren, Bodenheizung, ev. Anteile)	Eigentümer, subsidiär Energieberater
Technik	Installierte Heizleistung und Vorlauftemperatur vor Erneuerung	Eigentümer, subsidiär Energieberater
Technik	Lüftung (Schachtlüftung, Küchen-/Badlüftung, Wohnungslüftung)	Eigentümer, subsidiär Energieberater
Strombedarf	Strombedarf (falls mögl. Warmwasser und Wärmepumpe separat)	Eigentümer, EVU, subsidiär Energieberater

Der Stromverbrauch für Beleuchtung, feste Geräte, IT/Geräte etc. ist nicht eigentlicher Kern der Untersuchung, sondern dient lediglich als Parameter für die Berechnung des Heizwärmebedarfs. Deshalb wird diesbezüglich in der Regel auf Standardwerte und Annahmen zurückgegriffen.

3 Gebäude- und energiebezogene Standorttypologie

Im Fokus des Forschungsprojekts stehen Gebäude, die vor 1991 gebaut wurden. Für drei bis vier Typen von Einfamilienhäusern, vier bis fünf Mehrfamilienhaustypen (davon oder zusätzlich eine Siedlung), mindestens ein Bürogebäude und mindestens ein Schulgebäudetyp sind LICS konkrete Fallstudien zu entwickeln und zu bewerten. Für die Beurteilung, welche Fälle davon besonders relevant sind, wird eine Typologie erstellt, wobei die folgenden zwei hauptsächlich Dimensionen berücksichtigt werden:

1. Gebäudetypologie: hierbei geht es um die Typisierung des Gebäudebestands in Bezug auf Charakteristika wie Grösse, Bauart/Konstruktionstyp, Gebäudehüllenstruktur (Fensterarten und -grössen, Dachform), Nutzung (inkl. Reserven, z.B. im Dachraum), Technisierung, bisher durchgeführte Effizienzmassnahmen, etc.
2. Energiebezogene Standorttypologie: hierbei geht es um die Verfügbarkeit von leitungsgebundenen Energieträgern (z.B. Gas, Fernwärme) und von lokalen Potenzialen erneuerbarer Energiequellen oder um Einschränkungen zur Nutzung solcher Potenziale.

Auf diese beiden Typologien wird nachfolgend näher eingegangen. Die anschliessende Synthese bildet dann die Basis für die weiterführenden Arbeiten.

3.1 Gebäudetypologie

Die fünf häufigsten Mehrfamilienhaustypen mit Baujahr vor 1990 im Schweizer Gebäudepark gemäss Fischer & Schwehr (2010) sind: (1) Mehrfamilienhaus mit vier bis fünf Wohngeschossen, einseitig angebaut, gebaut in der frühen Nachkriegszeit um 1950, (2) Mehrfamilienhaus mit drei Wohngeschossen, einseitig angebaut, gebaut in der frühen Nachkriegszeit um 1950, (3) Mehrfamilienhaus mit drei Wohngeschossen, freistehend, gebaut in der frühen Nachkriegszeit um 1950, (4) Mehrfamilienhaus mit drei Wohngeschossen, freistehend, gebaut in der Zwischenkriegszeit um 1930 und (5) Mehrfamilienhaus mit drei Wohngeschossen, einseitig angebaut, gebaut in der späten Nachkriegszeit um 1980.

Fischer & Schwehr (2010) erstellten ihre Typologie mit einem Fassadenfokus im Hinblick auf die Vorfertigungsfragestellung. Für den Zweck des LICS-Projekts ist eine ganzheitlichere Typologie (Fischer R. et al., 2012) erforderlich, in der insbesondere auch der Dachbereich einzubeziehen ist. Die fünf Gebäudetypen werden entsprechend leicht angepasst, weitergehend beschrieben und mit einem weiteren wichtigen Gebäudetyp ergänzt (Nr. 6):

1. Mehrfamilienhaus mit vier bis fünf Wohngeschossen, ein- oder zweiseitig angebaut, gebaut in der Nachkriegszeit ab 1950 bis in die späten 1970er, einspringende Balkone, Flachdach
2. Mehrfamilienhaus mit drei Wohngeschossen, einseitig angebaut, gebaut in der frühen Nachkriegszeit um 1950, Flachdach
3. Mehrfamilienhaus mit drei Wohngeschossen, freistehend, gebaut in der frühen Nachkriegszeit um 1950, Steildach

4. Mehrfamilienhaus mit drei Wohngeschossen, freistehend, gebaut in der Zwischenkriegszeit um 1930, Steildach, Dachraum nicht ausbaubar (zu geringe Nutz hohe)
5. Mehrfamilienhaus mit drei Wohngeschossen, einseitig angebaut, gebaut in der späten Nachkriegszeit nach 1980, Steildach, Dachraum ausgebaut
6. Mehrfamilienhaus, evtl. mit Laden im Erdgeschoss, 5-geschossig, in Blockrandbauweise, erbaut vor 1930, Steildach, Dachraum bereits teilweise genutzt

Form

Die Bedeutung der Flachdächer, die grundsätzlich als Standort für WP oder Wärmetauscher von Splitgeräten in Frage kommen könnten, ist je nach Gebäudetyp und Bauperiode unterschiedlich, wie folgende Tabelle 13 aufzeigt. Der Anteil an Flachdächern ist v.a. bei Nichtwohngebäuden, speziell bei Bürogebäuden, hoch. Bei diesen nahmen die Anteile hin zu jüngeren Bauperioden laufend zu. Bei den MFH wurden die Flachdächer nach einem ersten Höhepunkt in der Hochkonjunktur in den 1980er und 1990er wieder weniger «populär», d.h. es wurden wieder mehrheitlich Steildächer erstellt. Ab 2000 sind jedoch wieder Flachdächer in der Mehrheit, typischerweise verbunden mit einer Attikawohnung, welche eine hohe Wohnattraktivität aufweist.

Tabelle 13 Anteile Flachdächer pro Gebäudetyp und Bauperiode

	EFH	MFH	BUR
Bis 1945	2%	16%	30%
1946 – 1980	10%	50%	69%
1981 – 2000	7%	39%	80%
2001 – 2015	25%	68%	90%

Quelle: Gebäudeparkmodell TEP Energy basierend auf Auswertungen des 3D-Modells von Swisstopo

Energie- und bautechnischer Zustand

Bei der Mehrheit der Objekte der Kategorien 1 bis 4 kann davon ausgegangen werden, dass bis heute bereits gewisse Erneuerungsmassnahmen und auch energetische Verbesserungen gegenüber dem Originalzustand vorgenommen wurden. Dies zeigen Erhebungen von TEP Energy in 19 Kantonen (Jakob et al., 2021), siehe Abbildung 4. Bei der Kategorie 6 sind die Fenster ebenfalls zu grossen Teilen ersetzt worden. Beim fünften Typ, erbaut nach 1980, kann davon ausgegangen werden, dass bereits zum Zeitpunkt der Gebäudeerstellung eine gewisse Wärmedämmung angebracht wurde und dass bei einem Teil der Gebäude dieses Typs die Heizanlage ganz oder teilweise instandgesetzt und/oder erneuert wurde. Bei den Fenstern ist dies beispielsweise bei 20 bis 25% der Gebäude, die zwischen 1980 und 2000 erstellt wurden, der Fall.

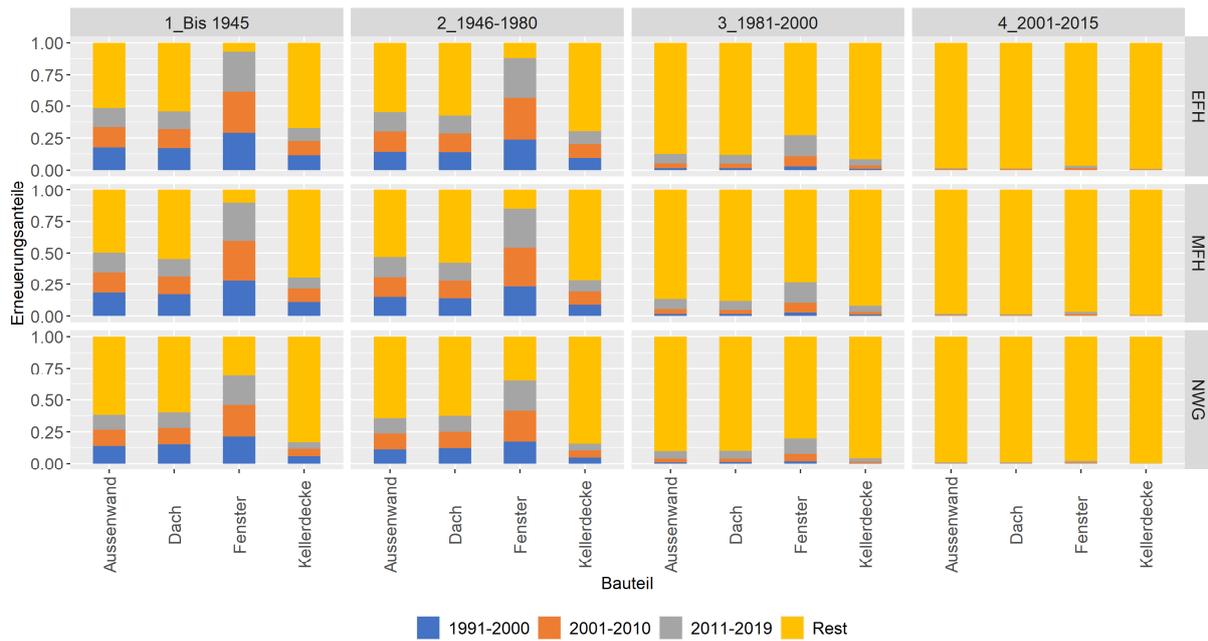


Abbildung 4 Energetische erneuerte Bauteile pro Erneuerungsperiode seit 1991 und nicht-energetisch erneuerte Bauteile, pro Gebäudesektor und Bauperiode, exemplarisch dargestellt für den Kanton AG. Quelle: übernommen aus Jakob et al. (2021)

In Bezug auf bereits durchgeführten Massnahmen zeigen Auswertungen von Ergebnissen des Gebäudeparkmodells (durchgeführt durch Nägeli et al. (2020)), dass sowohl energetische als auch emissionspezifische Kennwerte eine relativ grosse Verteilung aufweisen.

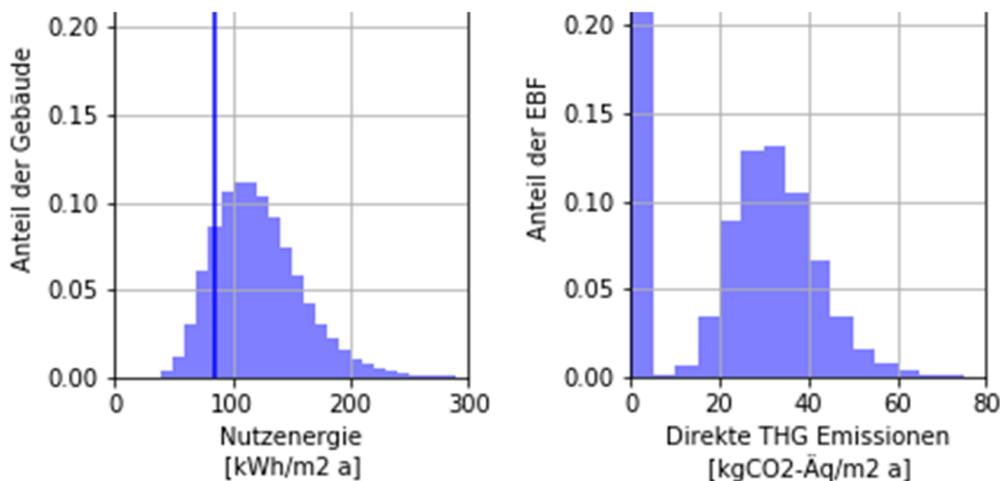


Abbildung 5 Häufigkeitsverteilung von Nutzenergie und direkten CO₂-Emissionen von Wohngebäuden (Quelle: Auswertung von GPM-Ergebnissen, TEP Energy und Chalmers University). Die vertikale Linie stellt den Top 15% Benchmark dar

3.2 Energiebezogene Standorttypologie

Gemäss den Ergebnissen von umfangreichen GIS-Analysen und Auswertungen von Ergebnissen des Gebäudeparkmodells wurden die häufigsten Standorttypen und ihre Relevanz für die verschiedenen Gebäudetypen ermittelt und in Tabelle 14 zusammengefasst. Die entsprechenden Analysen wurden im Rahmen der Studie zur Dekarbonisierung des Wärmesektors im Auftrag der Wärmeinitiative Schweiz (WIS) (Jakob et al., 2020) und für die BFE-Energieperspektiven 2050+ (Prognos, TEP Energy, Infrac, & Ecoplan, 2021) durchgeführt. Damit kann eine Gesamttopologie der Wärmeversorgungsmöglichkeiten erstellt werden, welche die erneuerbaren Potenziale und räumlichen Restriktionen (bzgl. der Nutzungsmöglichkeit für Erdwärmesonden- und Luft/Wasser-WP), mit den potenziellen nachfrageseitigen Wärmeclustern (thermische Netze, thermische Verbunde) berücksichtigt.

Tabelle 14 Häufigste Standorttypen und ihre Relevanz für die verschiedenen Gebäudetypen

Energie dichte	Typologie Kriterium			Relevant für
	Luft/Wasser WP	Erdsonden WP	Nah-/Fernwärme	
Tief	Möglich	Möglich	Nicht verfügbar	EFH , kleine MFH, vereinzelt NWG
Tief	Möglich	Nicht möglich (***)	Nicht verfügbar	EFH , kleine MFH, vereinzelt NWG
Mittel	Bedingt möglich (*)	Nur möglich inkl. Regeneration	Evtl. künftig verfügbar	MFH , z.T. auch NWG
Mittel	Bedingt möglich (*)	Nicht möglich (***)	Nicht verfügbar	MFH , z.T. auch NWG
Hoch	Nicht möglich (*)	Nur möglich inkl. Regeneration	Nicht verfügbar (**)	MFH, NWG
Hoch	Nicht möglich (*)	Nur möglich inkl. Regeneration	Künftig verfügbar	MFH, NWG
Hoch	Nicht möglich (*)	Nur möglich inkl. Regeneration	Verfügbar	MFH, NWG
Hoch	Nicht möglich	Nicht möglich (***)	Künftig verfügbar oder verfügbar	MFH, NWG

(*) Unter Umständen mit spezifischen Massnahmen möglich

(**) z.B. weil keine grosse erneuerbare Energiequelle wie ein See, ein Fluss, eine ARA oder eine KVA in der Nähe vorhanden ist (je nach Grösse des thermischen Verbunds zwei, fünf oder zehn Kilometer) und/oder die Grenzkosten der Wärmeverteilung zu hoch sind, selbst unter Dekarbonisierungsgesichtspunkten.

(***) z.B. wegen Gewässerschutzgebiet

Quelle: TEP Energy, LTL, Studio Durable, dieses Projekt

Die Ergebnisse dieser Analysen liefern erste Hinweise über die quantitative Bedeutung einzelner Dimensionen der folgenden Typologie. Grundsätzlich gibt es eine relative hohe Zahl an Kombinationsmöglichkeiten. Um die Ergebnisse kompakt und überschaubar zu halten, wurden im technischen Bericht der EP 2050+ folgende interessante Fälle (Potenzialtypen) eingegrenzt und speziell auf «neue» erneuerbare Quellen bzw. Systeme fokussiert.

- Es sind nur dezentrale (ortsfeste) Systeme möglich bzw. innerhalb der gesetzten Grenzkosten sind Verbundlösungen⁶ nicht wirtschaftlich. Bei den dezentralen Systemen unterscheiden wir zwischen Erdwärmesonden-WP und Luft/Wasser-WP.
- Es sind nur (thermische) Verbundlösungen möglich und innerhalb der gesetzten Grenzkosten wirtschaftlich, nicht jedoch ortsfeste dezentrale WP-Systeme.
- Es sind sowohl dezentrale WP-Systeme als auch (thermische) Verbundlösungen möglich und wirtschaftlich.
- Es sind weder dezentrale WP-Systeme noch (thermische) Verbundlösungen möglich bzw. wirtschaftlich (sondern nur Systeme wie z. B. Holz, Öl oder Gas, falls vorhanden).

Auswertungen

Bei mittleren Grenzkosten der Wärmeverteilung gemäss Tabelle 5 der WIS-Studie (8 Rp./kWh bei EFH, 6.5 Rp./kWh bei MFH und 6 Rp./kWh bei NWG) sind gemäss Ergebnissen der GIS-Analysen⁷ bei etwas mehr als der Hälfte der EBF sowohl dezentrale WP-Systeme als auch (thermische) Verbundlösungen möglich (siehe Tabelle 15). Bei knapp 30 % der EBF sind nur dezentrale WP möglich (Erdwärmesonden- und /oder Luft/Wasser-WP) und bei 17 % nur Verbundlösungen, jedoch keine dezentralen WP.

Die Typologie der Potenziale und Restriktionen unterscheidet sich in Abhängigkeit der unterstellten Grenzkosten der Wärmeverteilung (tief, mittel, hoch gemäss Tabelle 5 und Methodik in Jakob et al. 2020) bei den Verbundlösungen relativ stark (Tabelle 15): Bei tiefen Grenzkosten reduziert sich der Anteil der thermischen Netze und der Anteil der dezentralen Lösungen erhöht sich. Zudem erhöht sich auch der Anteil der EBF, bei dem keine ortsgebundene oder ortsfeste nutzbare Potenziale verfügbar sind (auf 7 %). Umgekehrt erhöht sich der Anteil der möglichen Verbundlösungen bei hohen Grenzkosten um weitere 13 %-Punkte, wobei vornehmlich «Konkurrenzgebiete» zulegen, bei denen auch dezentrale Systeme möglich wären.

⁶ Berücksichtigt sind potenzielle thermische Netze, die sich mit einer ortsfesten erneuerbaren Energiequelle (inkl. KVA und ARA) verbinden lassen. Potenzielle Verbunde, die nur mit lager- und transportierbaren Energiequellen betrieben werden könnten, wurden nicht berücksichtigt. Hingegen werden solche Energieträger annahmengenässig für die Spitzenlastdeckung eingesetzt.

⁷ Methodik siehe WIS-Studie oder Technischer Bericht der Energieperspektiven 2050+

Tabelle 15 Topologie der Potenziale und Restriktionen für dezentrale Wärmepumpen und potenzielle leitungsgebundene Energieträger bei den unterstellten Grenzkosten (GK) der Wärmeverteilung (tief, mittel, hoch gemäss Tabelle 5 in Jakob et al. 2020).

	GK Tief	GK Mittel	GK Hoch
Nur thermischer Verbund (ohne dezentrale Lösungen)	12 %	17 %	18 %
Thermischer Verbund + dezentrale WP (Erdwärmesonden-WP oder L/W-WP)	26 %	53 %	65 %
WP-Erdwärmesonde + WP-L/W	28 %	18 %	11 %
WP-L/W	9 %	4 %	2 %
WP-Erdwärmesonde	18 %	6 %	3 %
Keine ortsgebundene oder ortsfeste nutzbare Potenziale	7 %	2 %	1 %
Total	100 %	100 %	100 %

Quelle: TEP Energy, übernommen aus Energieperspektiven 2050+ (Kemmler et al., 2021)

Bei höherer Wärmedichte und -nachfrage (Gemeinden grösser 10'000 Einwohner) können mehr Gebiete z. B. über Verbundlösungen erschlossen werden als in Gebieten mit geringerer Energiedichte (Gemeinden kleiner 10'000 Einwohner). Bei mittleren Grenzkosten der Wärmeverteilung beträgt der Unterschied rund 30 %-Punkte (85 % statt 55 %). Umgekehrt ist der Anteil, bei dem keine dezentralen Lösungen möglich sind (sondern nur thermische Verbunde oder andere leitungsgebundene Energieträger) bei kleinen Gemeinden mit 11 % wesentlich tiefer als bei grösseren Gemeinden, wo der Anteil fast doppelt so hoch ist (23 %). Bei den MFH bei 15% bis 20% der Gebäude auf dem Land und bei 25% bis 30% in den Städten weder Erdwärmesonden- noch Luft/Wasser-Wärmepumpen möglich. Insbesondere in grösseren Gemeinden und umso mehr in Städten ist also der Anteil, bei denen ein leitungsgebundener Energieträger erforderlich ist, nicht vernachlässigbar.

Aufgrund der hohen potenziellen Bedeutung von Luftwasser-WP wird im Kap. 7 eine Parameterstudie präsentiert, in welcher Lärm- und damit Abstandsparameter variiert werden, um aufzuzeigen, welchen Beitrag LICS in Form von bivalenten und damit leiseren WP haben könnten.

3.3 Synthese der Gebäude- und energiebezogenen Standorttypologie

Vor dem Hintergrund der oben dargestellten Gebäude- und Standorttypologie und auf Grund der Erfahrung aus anderen Projekten werden Massnahmenkombinationen für folgende Gebäudetypen ermittelt (Tabelle 16).

Tabelle 16 Zu untersuchende Wohn- und Nichtwohngebäudetypen

Nr.	Gebäudetypologie		Energiebezogene Standorttypologie			
	Gebäudetyp, Grösse	Bauperiode	Energieeffizienz (Nutzenergie)	Luft/Wasser-WP	Erdsonden-WP	Nachfragedichte / Verfügbarkeit bzw. Eignung Nah-/ Fernwärme
1	MFH, klein, 2 Geschosse, freistehend	BP1a (vor 1920)	Mittel, Gesamt-sanierung ohne Fassade um 2000	Möglich	Nicht möglich (Gewässer-schutzgebiet)	Ländlich, FW nicht verfügbar
2	MFH, mittelgross, 3 Geschosse freistehend	BP1b (1920 bis 1950)	Mittel, Teil-sanierung (z.B. Fenster und Dachboden 1990er)	Möglich (mit konventionellen Massnahmen)	Nicht möglich (Gewässer-schutzgebiet)	Agglomeration, Nahwärme verfügbar
3	MFH, Siedlung (5 bis 20 Gebäude, 2- und 3spanner)	BP2a (1951-1980)	Schlecht, nur Fenster saniert (ca. 2000)	Evtl. möglich (innerhalb Siedlung)	Nur möglich inkl. Regeneration	Städtisch (Aussenquartier), FW künftig verfügbar
4	MFH (*), mittelgross (7-10 Wohnungen, evtl. mit Geschäft), freistehend	BP2a (1951-1980)	Mittel, Fassade, Fenster mit tiefem, Dach mit hohem Standard saniert.	Möglich (mit konventionellen Massnahmen)	Möglich	Agglomeration, FW nicht verfügbar
5	MFH (*), gross, 5 Geschosse, ein- oder zwei-seitig angebaut	BP2a (1951-1980)	Schlecht, nur Fenster saniert (ca. 1990)	Evtl. mit LICS möglich (zu prüfen)	Nicht möglich	Innerstädtisch, FW künftig verfügbar
6	MFH (*), mittelgross, 3 Geschosse, einseitig angebaut	BP2b (1981-1990)	Mittel, nicht saniert	Möglich	Nur möglich inkl. Regeneration	Städtisch (Aussenquartier), Agglomeration, FW künftig verfügbar
7	Bürogebäude, mittelgross, Bandfenster	BP2b (1981-1990)	Mittel, Flachdach saniert	Evtl. mit LICS möglich (zu prüfen)	Nicht möglich	FW künftig verfügbar
8	EFH, klein, freistehend	BP1b (1920 bis 1950)		Möglich	Möglich	Nahwärme künftig verfügbar

9	EFH, mittel, freistehend	BP2a (1950 bis 1980)	Schlecht, nicht saniert	Möglich	Möglich	Nicht verfügbar
10	EFH, gross, freistehend	BP2b (1981-1990)	Mittel, nicht saniert	Möglich	Möglich	Nicht verfügbar

(*) Auch als Siedlung

Quelle: TEP Energy, LTL, Studio Durable, dieses Projekt

Basierend auf der Zusammenstellung der zu untersuchenden Wohn- und Nichtwohngebäudetypen (Tabelle 16) werden im Kap. 6.1 die zu betrachteten Fallbeispiele präsentiert.

4 Aktualisierung und Kontextualisierung von Kostenkennwerten

Im Arbeitspaket AP2 geht es um die Aktualisierung und Kontextualisierung der techno-ökonomischen Datenbasis von bestehenden Technologieangeboten und Herangehensweisen sowie um die Formalisierung der Kostenkennwerte gemäss transparenter und anerkannter Methodik. Dabei lassen sich die resultierenden Kostenkennwerte des AP2 in Heizanlagenkennwerte und Gebäudehüllenkennwerte aufteilen.

4.1 Kostenkennwerte Heizanlagen

4.1.1 Herleitung der Kostenkennwerte

Für den Heizungersatz mit Wechsel des Energieträgers (Systemwechsel) wurden Kostenkennwerte für die Leistungsklassen 10 kW, 20 kW und 100 kW der folgenden Heizsysteme erarbeitet:

- Ölkessel
- Gaskessel
- Pelletkessel
- Luft/Wasser-Wärmepumpen und
- Sole/Wasser-Wärmepumpen.

Als Grundlage dienen die Investitionskosten aus dem Heizsystemvergleichsrechner der Hochschule Luzern (HSLU) (siehe HSLU (2020)), welche mit weiteren Kostenpunkten ergänzt wurden und zwar für zusätzliche Teilanlagen (Heizverteiler, Warmwasserspeicher), Nebengewerke (Elektro, Sanitär, Gebäudeautomation (GA), Baumeister, Gartenbau) und Honorare.

Die Kostenkennwerte enthalten die Gesamtkosten der Wärmeerzeugung bis und mit Heizverteiler und Warmwasserspeicher, Steuerung, Elektro, Sanitär, bauliche Nebenkosten, Honorar, Bewilligung, MWST.

Die Kostenkennwerte der Nebengewerke sind weitgehend analytisch, bottom-up hergeleitet und punktuell auch anhand von verfügbaren Bauabrechnungen und Unternehmer-Offerten plausibilisiert.

Die Leistungswerte bei den L/W-WPs beziehen sich auf den Auslegungspunkt A-8/W55 und nicht auf die Nennleistung bei A2/W35. Bei A-8 ist die thermische Leistung gegenüber der Nennleistung bei vielen Wärmepumpen um 30 bis 50% reduziert.

Bei S/W-Wärmepumpen beruhen die Kosten der Erdsonden auf folgenden Annahmen:

- Kosten pro Bohrmeter inkl. Grabarbeiten, Verbindungsleitungen, Sammler etc.: 100 CHF/m
- Spezifische Kälteleistung pro Meter Erdsonde: 35 W/m
- Meter Erdsonden pro kW Heizleistung, COP = 4.5: 22 m
- Meter Erdsonden pro kW Heizleistung, COP = 3.5: 20 m

Eine allfällig notwendige Regeneration der Erdsonden durch unverglaste Solarkollektoren oder PVT Hybridkollektoren (nur der thermische Anlagenteil) inkl. Verbindungsleitung zur Heizzentrale wird wie folgt bemessen:

- Wärmeertrag pro Kollektorfläche: 350 kWh/m²
- Kosten pro Kollektorfläche: 350-600 CHF/m²

4.1.2 Preisstand

Die Kostenkennwerte im Bereich Heizanlagen basieren auf dem Heizkostenrechnung der Hochschule Luzern (HSLU), die Praxispartnern validiert wurden, sowie auf der Auswertung von zahlreichen umgesetzten Projekten. Räumlich stammen diese schwerpunktmässig aus dem Grossraum Zürich, zeitlich mehrheitlich aus der Periode 2017 bis 2020. Diese Periode, inkl. einiger weiterer davor liegender Jahre, zeichnet sich durch eine relativ hohe Preisstabilität aus. In der Folge hat die Bauteuerung stark angezogen und ist geprägt durch Preisschwankungen und Preisausschlägen. Diese sind in den erhobenen Daten und demzufolge in den damit durchgeführten Wirtschaftlichkeitsrechnungen nicht enthalten.

Die im Bericht verwendeten Preise sind entsprechend für die gesamtschweizerische Situation zum einen eher zu hoch (Auswertungen mit Fokus Grossraum Zürich) und zum anderen für den Zeitpunkt der Schlussredaktion dieses Berichts (Oktober 2022) eher zu tief. Die beiden Effekte dürften sich in etwa ausgleichen. Jedoch ist in der Folge die weitere Preisentwicklung genauer als in den vergangenen Jahren zu beobachten, wenn es darum geht, Kostenvergleich zu erstellen (dies gilt insbesondere auch für Wirtschaftlichkeitsrechnungen, bei denen auch die Energiepreise eine wesentliche Rolle spielen und die besonders seit 2022 stark volatil sind).

4.1.3 Erläuterungen zu den Kostenstufen

Zu jedem Kostenpunkt werden drei Kostenstufen angegeben, jeweils für eine günstige, eine mittlere und eine aufwändige Anlage. Diese drei Kostenstufen werden wie folgt charakterisiert:

- Das Attribut günstig steht je nach Kostenpunkt für ein kostengünstiges Produkt, eine günstige Ausgangslage bzw. eine günstige Einbausituation. Als günstige Ausgangslage gilt z.B., wenn bei einem Wechsel des Wärmeerzeugers gewisse Teile der bestehenden Heizungsanlage wie z.B. Heizverteiler oder Warmwasserspeicher unverändert übernommen werden können.
- Die mittlere Kostenstufe stellt in der Regel den am häufigsten anzutreffenden Fall dar.
- Demgegenüber steht «aufwändig» für ein hochpreisiges Produkt, eine aufwändige Ausgangslage oder eine aufwändige Einbausituation.

Für jeden Kostenpunkt wird abgeschätzt, wie häufig die einzelnen Kostenstufen bei allen realisierten Systemwechseln in dieser Leistungsklasse auftreten. Für das Beispiel einer Wärmepumpenanlage von 10 kW werden die Überlegungen zu den drei Kostenstufen pro Kostenpunkt erläutert. Die Kosten pro Kostenstufe und pro Kostenpunkt und die abgeschätzte Häufigkeit sind in Tabelle 17 dargestellt.

- Beim ersten Kostenpunkt, der Wärmepumpe bzw. dem Gerät selbst, wird angenommen, dass bei 20% der realisierten Anlagen ein günstiges Produkt eingesetzt wird. Die günstigen Produkte kosten rund 10% weniger als die Produkte im mittleren Preissegment, wel-

che 60% der realisierten Anlagen ausmachen. Aufwändige Wärmepumpen machen 20% des Marktes aus und sind 10% teurer als jene im mittleren Preissegment.

- Analoges gilt für die folgenden Kostenpunkte «Armaturen & Apparate», «Heizungsspeicher» und «Montage» (inkl. Transport). Beim Heizverteiler wird angenommen, dass 90% der Wärmepumpen in der Leistungsklasse von 10 kW keinen separaten Verteiler brauchen. Die Heizgruppe und die Warmwassergruppe sind direkt in der Kompaktwärmepumpe integriert. Bei der Leistungsklasse von 20 kW benötigen 70% der Anlagen keinen externen Heizverteiler, bei 100 kW benötigen dagegen 80% der Anlagen einen neuen Heizverteiler, bei 20% der Anlagen kann der bestehende Heizverteiler unverändert weitergenutzt werden.
- Beim Kostenpunkt «Warmwasserspeicher» wird angenommen, dass 20% der 10 kW Anlagen keinen neuen Speicher benötigen, der bestehende also noch weiter genutzt werden kann. Bei 70% wird ein Warmwasserspeicher im mittleren Preissegment und bei 10% einer im hohen (=aufwändigen) Preissegment installiert.
- Beim Kostenpunkt «Demontage» wird angenommen, dass bei 20% der 10 kW Anlagen keine Demontage notwendig ist, bzw. diese nicht separat verrechnet wird. Bei 60% der Anlagen liegt der Demontageaufwand im mittleren Bereich, bei 20% sind die Demontearbeiten oder der Abtransport der rückgebauten Anlagenteile aufwändig.
- Bei den Kostenpunkten des Elektroinstallateurs «Erschliessung Elektro», «Elektrokasten» (Hauptverteilung) und «Anschlussgebühren» (Hausanschluss) wird bei den 10 kW Anlagen angenommen, dass diese Arbeiten zu 60 bis 80% günstig sind oder ganz entfallen, weil z.B. der bestehende Hausanschluss unverändert weitergenutzt werden kann. Bei den Leistungsklassen 20 kW und 100 kW muss dagegen bei 30% respektive 70% aller Anlagen die Hausanschlussleitung erneuert und verstärkt werden, mit entsprechenden Kostenfolgen.
- Beim Kostenpunkt des Sanitärinstallateurs «Erschliessung Sanitär» wird angenommen, dass bei 20% der 10 kW Anlagen keine Arbeiten notwendig sind. Dies entspricht dem Anteil der Anlagen, bei denen der Warmwasserspeicher weitergenutzt werden kann. Bei 60% der Anlagen liegt die Erschliessung Sanitär im mittleren und bei 20% im hohen (aufwändigen) Preisniveau.
- Beim Kostenpunkt Gebäudeautomation (GA) wird angenommen, dass bei 80% der 10 kW Anlagen ein integrierter Heizungsregler zusammen mit der Wärmepumpe geliefert wird und damit keine zusätzlichen GA-Kosten entstehen.
- Vom Kostenpunkt Sicherheitsanlagen, z.B. für eine Sturmlüftung, Explosionsschutzmassnahmen oder eine Brandmeldeanlage für den Fall einer Leckage mit Kältemittelaustritt, sind Anlagen in der Leistungsklasse von 10 kW kaum betroffen. Mit der Einführung natürlicher Kältemittel könnten hier aber in Zukunft höhere Kosten anfallen.
- Zusätzliche Lärmschutzmassnahmen, z.B. eine Schallschutzhaube oder -wand zur Abschirmung der Ausseneinheit der Wärmepumpe, sind schätzungsweise nur bei 30% der 10 kW-Anlagen notwendig. Bei Leistungsstufen über 20 kW und insbesondere im städtischen Siedlungsgebiet sind bei den meisten L/W-Wärmepumpen zusätzliche Lärmschutzmassnahmen notwendig.

- Begrenzte Baumeister- und Gartenarbeiten sind bei 90% aller Luft/Wasser-Wärmepumpen mit Split-Bauweise oder Aussenaufstellung notwendig.
- Bei Sole/Wasser Wärmepumpen sind immer Baumeister- und Gartenarbeiten notwendig. Deren Umfang ist stark von den lokalen Rahmenbedingungen abhängig und liegt im Bereich von 5% (günstig) bis 15% (aufwändig) der Gesamtkosten.

Tabelle 17 Kostenstruktur am Beispiel einer 10 kW Luft/Wasser Wärmepumpe; dargestellt sind durchschnittliche Kosten für Neubauten und drei Kostenstufen für den Heizungsersatz mit Energieträgerwechsel

Teilanlage / Leistung	BKP	10 kW					
		Systemwechsel - Kostenstufen					
		günstig		mittel		aufwändig	
		CHF	%	CHF	%	CHF	%
WP (L/W) - Split oder Aussenaufstellung							
Wärmepumpe	242	15'750	20	17'500	60	19'250	20
Armaturen & Apparate	242	900	20	1'000	60	1'100	20
Heizungsspeicher	242	1'260	20	1'400	60	1'540	20
Montage	242	4'250	20	8'500	60	9'350	20
Heizverteiler	243	0	90	1'000	10	1'100	0
Warmwasserspeicher	242	0	20	1'000	70	1'100	10
Demontage	240	0	20	1'000	60	1'500	20
Total Heizungsanlagen	24	22'160		31'400		34'940	
Erschliessung Elektro	232	1'950	60	3'120	20	3'900	20
Mehrauf. Elektrokasten	231	0	60	550	20	825	20
Anschlussgebühren	231	0	80	2'080	10	3'120	10
Erschliessung Sanitär	254	0	20	500	60	1'000	20
GA (Steuerung und Messung)	236	0	80	1'000	10	1'500	10
Sicherheitsanlagen	247	0	100	0	0	0	0
Lärmschutzmassnahmen	272	0	70	1'000	20	2'000	10
Baumeister	211	0	10	1'000	50	2'000	40
Gartenarbeiten	421	0	10	1'000	50	2'000	40
Total weitere Kosten		1'950		10'250		16'345	
Honorar HLKSE-Ingenieure	294, 29	0	80	6'248	10	10'257	10
MWSt		150		1'430		2'289	
Gesamtkosten inkl. Honorar und MWSt		24'260		49'328		63'831	

Je nach Kostenpunkt unterscheidet sich der Anteil an Heizsystemen, bei welchen im Falle eines Systemwechsels der günstige Fall, der mittlere Fall oder der aufwändige Fall eintritt (vgl. Prozentsätze in Tabelle 17). Anhand sogenannter Kostenstufen können diese Unterschiede besser illustriert werden (siehe Abbildung 6). Es sind die gleichen Kostenpunkte für eine 10kW L/W-WP wie in Tabelle 17 dargestellt. Die Investitionskosten für die Wärmepumpe sind für den aufwändigsten Fall nur ca. 20% höher als im günstigen Fall. Gleichzeitig nehmen beispielweise die Baumeisterkosten sehr viel stärker zu (100%). In sehr günstigen Fällen (ca. 10% der Objekte) kann sogar ganz auf die Baumeisterkosten verzichtet werden.

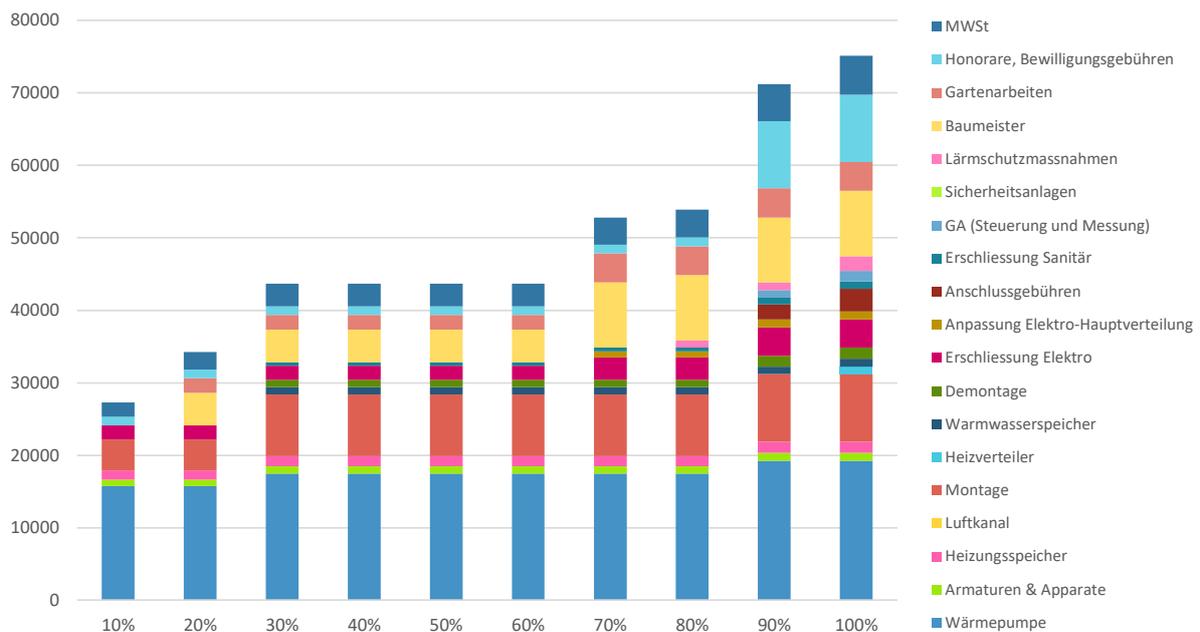


Abbildung 6: Kostenstufen für eine L/W-WP. Lesebeispiel: Die Investitionskosten bei einem Systemwechsel auf eine L/W-WP fallen in 20% der Fälle nicht höher als ca. 30'000 CHF aus.

In analoger Weise wurden Kostenkennwerte für die übrigen Systeme und die übrigen Leistungsklassen erarbeitet und dargestellt (siehe Abbildung 47 im Anhang).

4.1.4 Vergleich mit anderen Quellen mit Kostenkennwerten

Durch die Berücksichtigung aller Nebengewerke und der Honorare fallen die ermittelten durchschnittlichen Kostenkennwerte insgesamt höher aus, als jene der geläufigen Heizkostenvergleichsrechner (siehe Knechtli (2019) für eine Übersicht). Dies liegt aus unserer Sicht daran, dass bei der Analyse von Baukostenabrechnungen oft nur die Kosten des Heizungsunternehmers herangezogen werden, während die Aufwendungen aller Nebengewerke und Honorare nicht anteilmässig der Wärmeerzeugung angerechnet werden.

4.1.5 Bivalente Wärmeerzeugung

Die Kosten von bivalenten Heizungsanlagen werden anhand der Kostenkennwerte der einzelnen Wärmeerzeuger und ihrer entsprechenden Heizleistung bei Auslegungsbedingung ermittelt. Da sich insbesondere beim Spitzenlastsystem meist Einsparungen gegenüber einer monovalenten Ausführung ergeben, kann das Spitzenlastsystem standardmässig mit der Kostenstufe «günstig» abgebildet werden. Zudem können einzelne Kostenpositionen ganz entfallen, z.B. ein Pufferspeicher bei der Kombination einer Luftwärmepumpe mit einem Gas-Standkessel. Der Gas-Standkessel kann dabei aufgrund seines Wasserinhalts und der thermischen Wärmespeicherkapazität im Abtaubetrieb als Pufferspeicher genutzt werden (die Firma Hoval beispielsweise bietet ein entsprechendes Standardschema an).

Die Leistungsaufteilung zwischen Grundlast- und Spitzenlastsystem hängt von der Zielsetzung des Heizungsersatzes ab:

- Liegt der Fokus beim Klimaschutz, führt eine Leistungsaufteilung von 50% zu 50% bei einer bivalent-parallelen Betriebsweise zu einem Anteil des Spitzenlastsystems an der gesamten jährlichen Wärmeproduktion von 5 bis 15%.
- Liegt der Fokus hingegen auf tiefen Investitionskosten, wird eher eine Leistungsaufteilung zwischen Grundlast- und Spitzenlastsystem von 25% zu 75% realisiert. Das Spitzenlastsystem deckt in diesem Fall bei einer bivalent-parallelen Betriebsweise rund 25 bis 35% der jährlichen Wärmeproduktion.

Bei der Berechnung der Investitionskosten sind die Leistungsanteile und bei der Berechnung der Energiekosten, der Endenergieverbräuche sowie der CO₂-Emissionen sind die energetischen Anteile massgebend.

Wärmeerzeuger 1	WP (LW)	4
Aufstellungsort	innen	1
Wärmeleistung	20	kW

Wärmeerzeuger 2	Erdgas	1
Aufstellungsort	innen	1
Wärmeleistung	20	kW

Position	BKP		Kostenstufe	CHF	CHF/kW
Wärmeerzeugung 1					
1	241	Luftkanal (Innenaufstellung)	mittel	6'000	300
2	242	Wärmepumpe	mittel	31'000	1'550
3		Armaturen, Apparate, Rohrleitungen, Dämmung	mittel	4'500	225
4		Heizungsspeicher	mittel	2'500	125
5		Transport und Montage	mittel	7'500	375
6	23	Anschlussgebühren	mittel		
7		Zentrale Starkstomanlagen	mittel		
8		Erschliessung Elektro	mittel	6'000	300
9			mittel		
10		Total		57'500	2'875
Bauseitige Arbeiten					
13	211	Wanddurchbrüche, Kernbohrungen	mittel	8'500	425
14	272		mittel		
15	211		mittel		
		Wärmeerzeugung 1 + bauseitige Arbeiten		66'000	3'300
		Wärmeerzeuger 1	WP (LW)	20	kW
		Wärmeerzeuger 2	Erdgas	20	kW
		Total Wärmeerzeugung		84'620	

BKP		Kostenstufe	CHF	CHF/kW
Wärmeerzeugung 2				
241	Anschlussgebühren	x (entfällt)		
242	Gasheizkessel	günstig	4'880	244
	Armaturen, Apparate, Rohrleitungen, Dämmung	günstig	4'140	207
	Transport und Montage	günstig	6'000	300
245	Kamin	günstig	3'600	180
		günstig		
	Total		18'620	931
Bauseitige Arbeiten				
211	Grabarbeiten	x (entfällt)		
272		günstig		
211		günstig		
	Wärmeerzeugung 2 + bauseitige Arbeiten		18'620	931

Position		Kostenstufe	CHF	CHF/kW	
Optionale / zusätzliche Arbeiten					
1	240	Demontage bestehende Heizanlage	mittel	1'400	35
2	240, 211	Demontage bestehendes Lager, inkl. Baumeister	x (entfällt)		
3	253	Warmwassererzeugung, inkl. Elektro, Sanitär	mittel	8'000	200
4		Wärmepumpen-Boiler, inkl. Elektro, Sanitär	x (entfällt)		
5	243	Heizverteiler, inkl. Unterstationen ab 200 kW	mittel	6'880	172
6		Verteilleitungen	x (entfällt)		
7		Wärmeabgabe	x (entfällt)		
8	237	Überwachungsanlagen (Energiemonitoring)	x (entfällt)		
Honorar, Gebühren, MwSt					
9	290	Honorar, Gebühren	10%	10'090	252
10		MwSt	7.7%	8'546	214
		Gesamtkosten inkl. Honorar und MWSt		119'576	2'989

Abbildung 7 Beispiel für die objektspezifische Berechnung der Investitionskosten einer bivalenten L/W-Wärmepumpe mit Erdgas-Spitzenlastkessel

4.2 Kostenkennwerte Gebäudehüllenmassnahmen

Als Grundlage und Vergleichsbasis werden im LICS-Projekt auch Kostenkennwerte von Gebäudehüllensanierungsmassnahmen benötigt. Ausgegangen wird dabei von den Kostenkennwerten des INSPIRE-Tools. Diese beruhen auf dem Elementarten-Katalog (EAK) des CRB⁸ (M. Huber, Kühne, Pestalozzi, & Rüdener, 2011) und auf einer von der TEP Energy im Auftrag der Stiftung Klimarappen (SKR) durchgeführten Studie (Energetische Gebäudeerneuerungen – Wirtschaftlichkeit und CO₂-Vermeidungskosten (Jakob et al., 2010)).

Um die aus dem Jahre 2011 stammenden Kostenkennwerte zu aktualisieren, werden die einzelnen Kostenpunkte eines spezifischen Kostenkennwertes mit der entsprechenden Schweizer Preisindexveränderung des Bauteiles und der Veränderung der Materialpreise verrechnet. Das Vorgehen wird in den nächsten zwei Abschnitten näher erläutert.

BERECHNUNGS- UND DATENBASIS DER AUSGANGSLAGE:

Die originalen Kostenkennwerte, welche dem INSPIRE Tools hinterlegt sind, basieren auf den Berechnungsmethoden des von der CRB im Jahre 2011 publizierten EAKs, den empirischen Daten, welche im Auftrag der Stiftung Klimarappen ausgewertet wurden und den Preisen für verschiedene Dämmstoffe der Swisspor aus dem Jahre 2011. Dabei ist das Vorgehen wie folgt gewesen:

- Die Basis der Kostenberechnung beruht auf den Kostenkennwerten des EAK, welche für ein Mehrfamilienhaus berechnet wurden. Zum Teil wurde das Kostenniveau aufgrund der Ergebnisse des SKR-Berichts nach oben angepasst (besonders beim Wärmedämmverbundsystem (Kompaktfassade-Aussenwärmedämmung), weil hierbei der Wert im EAK sehr tief liegt).
- Die Basiswerte werden nachträglich mit den statistisch erhobenen marginalen Werten auf verschiedene Gebäudetypologien (EFH, Schulhaus, Büro), Anwendungen und Dämmstärken umgerechnet. Dies erfolgte anhand von Grundlagen des Projekts Grenzkosten sowie anhand von Preiskatalogen von Dämmstofflieferanten (Swisspor, Flumroc, Isover).

AKTUALISIERUNG DER KOSTENKENNWERTE

Die Herausforderung der Aktualisierung der Kostenkennwert sind folgende:

- Es gibt keinen direkten Nachfolger des EAK, welcher sich auf demselben Berechnungsvorgehen abstützt.
- Eine ausführliche Datenerhebung wie im Falle des Klimarappen-Berichtes ist im Rahmen des LICS-Projektes nicht möglich.

Um die bestehende Struktur möglichst aufrecht zu erhalten und um die Teuerung möglichst einheitlich zu implementieren, wurde die Berechnungsgrundlage der Kostenkennwerte im INSPIRE Tool beibehalten und durch die Verwendung des BFS Baupreisindex und des Preiskatalogs der Swisspor (Swisspor, 2020) auf den Stand von 2020 gebracht. Dies erfolgt

⁸ Centre Suisse d'études pour la Rationalisation du Bâtiment (heute Centre suisse pour la rationalisation de la construction)

mit der Baupreisindex Veränderung zwischen 2011 (BFS, 2021a) und 2020 (BFS, 2021b) für MFH, EFH, Schulhäuser und Büros für einzelne Gebäudehüllenmassnahmen wie z.B. Fenstererneuerungen, Wärmedämmungen, Zimmermanns- oder Spenglerarbeiten. Hierzu ist anzumerken, dass die Bauteuerung in diesem Zeitraum relativ gering war und zum Teil auch zu Preissenkungen geführt hat.

Diese Methodik erlaubt es zum einen, die in der Studie Energetische Gebäudeerneuerung – Wirtschaftlichkeit und CO₂-Vermeidungskosten (Jakob et al., 2010) erhobenen Zuschlagsfaktoren für verschiedene Gebäudetypen oder Dämmstärken weiter zu benützen und behält zum anderen die Methodik der CRB im Grundsatz bei. Nachteilig ist hierbei, dass sich der Preisindex einzelner Bauelemente zwar verändert hat, aber auch die Anforderungen und Qualität an die Bauteile bzw. die baulichen Effizienzmassnahmen. Dies ist bei den energetischen Berechnungen zu berücksichtigen.

Eine Auswahl der Ergebnisse der aktualisierten Gebäudehüllenkostenkennwerte ist in Tabelle 18 aufgeführt. Ein relevanter Faktor für die Interpretation der in Tabelle 18 präsentierten Werte ist die Definition der Systemgrenzen. Die Kostenkennwerte bauen auf dem eBKP der CRB auf und beschreiben daher klar definierte Bauleistungen. In der Praxis kommt es aber vor, dass gewisse zusätzliche, in dem eBKP nicht abgebildete «bauseitige» Kosten, anfallen können. Dies führt dazu, dass die Kostenkennwerte relativ stark streuen können, v.a. wenn nicht genau definiert ist, welche Bauleistungen im Kennwert enthalten sind. Dies gilt sowohl für energetische Massnahmen als auch für nicht-energetische Instandsetzungen (siehe (Jakob et al., 2010)). Teilweise können sog. «bauseitige» Leistungen ebenfalls in der Gliederung des eBKPs abgebildet werden. Sie sind bei der Kostenschätzung von konkreten Gebäudehüllenmassnahmen fallweise hinzuzuaddieren.

Tabelle 18: Verwendete Kostenkennwerte der Gebäudehüllenmassnahmen, welche auf der Basis des EAK und weiteren Quellen (siehe Text) berechnet wurden.

		Instand- setzung	Energetische Erneuerung
Fassade	Aussenwärmedämmung (Wärmedämmverbundsystem)	40-80	200
	Aussenwärmedämmung (hinterlüftete Fassade)	k.A.	240
Dach	Estrichbodendämmung	n.z.	80-100
	Nachträgliche Wärmedämmung Steildach	n.z.	180-200
	Komplette Erneuerung Steildach		350-450
	Nachträgliche Wärmedämmung Flachdach	50-100	250
Keller	Dämmung Kellerdecke	n.z.	100-140
Fenster	Fensterinstandsetzung bzw. -ersatz	20-40	830-1200

k.A.: keine Angabe n.z.: nicht zutreffend

Anzumerken ist, dass die Gegebenheiten im Einzelfall eher zu grösseren Streuungen führen als der konkrete Energieeffizienzstandard. Dies gilt sowohl für energetische Erneuerungen

als auch für Instandsetzungen (siehe z.B. Kap. 5.3 in (Jakob et al., 2010)). Der Einfluss des energetischen Standards auf die Kostenkennwerte betrug gemäss (Jakob et al., 2010) bei den opaken Bauteilen rund 10% oder weniger bzw. 20 CHF/m² oder weniger (Unterschied zwischen gesetzlichen Anforderungen und Minergie). Auch wenn sich Dämmmaterialien und Lohnkosten bis 2020 geringfügig (und nach 2020 deutlicher) verteuern, haben anderweitige Unsicherheiten (wie z.B. durch bauliche Folgekosten, Anpassungs- und Wiederinstandsetzungsarbeiten am Gebäude oder an der Umgebung) häufig einen grösseren Einfluss (typischerweise 50 bis 100 CHF/m² bis +50 bis 200 CHF/m²). Aus diesem Grund wird bei den Wirtschaftlichkeitsrechnungen der Fallstudien eine Sensitivitätsrechnung durchgeführt (siehe Kap. 6.4).

5 Konzeptentwicklung von neuen technischen Lösungen für Low-Invest-Cost-Sanierungen (LICS)

Umfangreiche Voranalysen haben gezeigt, dass ambitionierte CO₂-Emissionsgrenzwerte wie z.B. 6 kg CO₂ pro m² EBF allein mit gebäudehüllenseitigen Massnahmen im Gebäudebestand nicht erreicht werden können, wenn nicht ein Teil des Bedarfs durch erneuerbare Energien gedeckt wird. Weil zudem eine umfassende Gebäudehüllenerneuerung mit hohen Investitionskosten verbunden ist, wird bei der Konzipierung von Low Invest Cost Solutions ein Fokus auf erneuerbare Energien gelegt. Mit Verweis auf die beschränkten Potenziale sowie auf die Energieperspektiven (Kemmler et al., 2021) und die Gasstrategie des Bundes (BFE, 2019) werden die Energieträger Holz, Biomasse, Biogas, synthetische erneuerbare Gase, Wasserstoff und Bioöl als primäre Energieträger von monovalenten Systemen ausgeschlossen. Solche Energieträger können jedoch zur Spitzenlastdeckung in bivalenten Konstellationen zur Anwendung kommen. Ebenfalls nicht im Fokus stehen thermische Netze aller Art, deren Potenziale und Kosten bereits an anderer Stelle vertieft untersucht wurden (siehe z.B. Kap. 4 in Jakob et al. (2020) und Kap. 5.3 in (Kemmler et al., 2021)).

Im Rahmen des Projekts werden deshalb folgende technische Lösungen mit potenziell niedrigen Investitionskosten und entsprechend hohen Marktchancen beim Heizungsersatz konzeptionell weiterentwickelt:

LICS-Hauptmassnahme:

- Stadtverträgliche bivalente Luft/Wasser-Wärmepumpe
- Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Erdreich-Spitzenlastdeckung

Unterstützende LICS-Massnahmen:

- Senkung der Vorlauftemperatur durch verteilungsseitige Massnahmen
- Kostengünstige Lüftungskonzepte
- Wärmerückgewinnung Warmwasser

Nachfolgend werden diese LICS näher beschrieben.

5.1 Stadtverträgliche bivalente Luft/Wasser-Wärmepumpe

5.1.1 Ausgangslage

Luft/Wasser-Wärmepumpen sind verhältnismässig kostengünstig und haben in den vergangenen Jahren einen grossen Entwicklungsschub und relevante Effizienzgewinne erlebt. Obwohl auch die Lärmemissionen reduziert werden konnten, kommen diese bei mittleren und grösseren Mehrfamilienhäusern in der Stadt und in der Agglomeration aus Lärm- und Platzgründen resp. der Kosten für Schallschutzmassnahmen trotzdem nur selten in Frage.

Eine mögliche Lösung stellen bivalente modulierende Wärmepumpen dar, die aus Lärmschutzgründen im dichten Siedlungsgebiet bevorzugt im Keller oder auf dem Flachdach be-

stehender Gebäude aufgestellt werden. Die Spitzenlastdeckung erfolgt je nach Ausgangslage durch eine modulierende Gas-Wandtherme einen Öl- oder Pellet-Brennwertkessel. Anstelle von Gas oder Öl kann die Spitzenlast auch durch Biogas oder Biomethanol gedeckt werden. Mittel- und langfristig stehen voraussichtlich auch weitere, aus erneuerbarer Energie hergestellte Brennstoffe (Power-to-X) zur Verfügung.

Mit einer leistungsgeregelten Wärmepumpe ist es möglich, den Pufferspeicher wegzulassen, was Vorteile in der Form von Platz- und Kosteneinsparungen erbringt. Die elektrische Spitzenlast ist im Vergleich zu einer monovalenten Anlage stark reduziert. Die Regelung ist für den bivalenten Betrieb optimiert und unterstützt den Eigenverbrauch von PV-Strom sowie ein netzdienliches Lastmanagement.

Bei einer typischen Anlage deckt das Spitzenlastsystem 50% des Heizleistungsbedarfs und etwa 20% bis 25% des jährlichen Wärmebedarfs für Raumheizung und Warmwasser ab. Bei einer heute üblichen Bivalenzregelung wird das Spitzenlastsystem dazu geschaltet, sobald die Vorlauftemperatur über einen bestimmten Zeitraum, z.B. über 10 Minuten, unter dem Sollwert liegt. Diese Regelung führt zu relativ häufigen Starts des Spitzenlastsystems, oft auch im Sommer im Warmwasserbetrieb. Zudem führt die Zuschaltung des Spitzenlastsystems meist zu einer Erhöhung der Rücklauftemperatur, wodurch die Arbeitszahl und der Leistungsanteil der Grundlast-Wärmepumpe sinken (bivalent paralleler Betrieb).

Mit einer optimierten Bivalenzregelung soll der Energieanteil der Spitzenlast auf unter 10% reduziert werden. Dies hat einige wichtige Vorteile:

- Dank dem geringen Verbrauch kann die Spitzenlast mit einem lagerbaren Brennstoff gedeckt werden. Das Brennstofflager ist klein und damit platzsparend und kostengünstig.
- Die Kosten des Brennstoffs können aufgrund des geringen Verbrauchs relativ hoch sein, dadurch könnten mittelfristig auch aus erneuerbaren Energien hergestellte, synthetische Brennstoffe (Power-to-X) eingesetzt werden.
- Gegenüber einer monovalenten Anlage wird die elektrische Anschlussleistung der Wärmepumpe um 50% reduziert. Dies ist beim Heizungersatz in bestehenden Mehrfamilienhäusern relevant, da sonst oft eine neue Hausanschlussleitung benötigt wird. Zudem kann graue Energie gespart werden.
- Die Belastung des Stromnetzes wird während Kälteperioden deutlich reduziert.
- Die Kosten der bivalenten Lösung liegen, bei optimaler Planung, bei grösseren Gebäuden rund 40% bis 50% (siehe Luft/Wasser-Wärmepumpen im städtischen Bestand von Gasser (2019) unter den Kosten einer monovalenten Luft/Wasser-Wärmepumpe).
- Dank der kleineren Luft/Wasser-Wärmepumpe bleibt mehr Fläche auf dem Dach für die Installation von PV-Modulen und der bauliche Aufwand für die Heizzentrale sinkt. Dies führt zu tieferen Treibhausgasemissionen im Betrieb bzw. in der Erstellung.

Tabelle 19: Heizungersatz durch eine bivalente im Vergleich zu einer monovalenten Luft/Wasser-Wärmepumpe (Heizleistung > 25 kW)

Vorteile	Nachteil und Lösungsansatz
<ul style="list-style-type: none">• Rund 20% geringere Investitionskosten• 50% geringerer Platzbedarf der Ausseneinheit oder der Luftkanäle bei Innenaufstellung• Pufferspeicher entfällt• 10 dB(A) geringerer Schalleistungspegel• 50% geringere elektrische Anschlussleistung; eine allenfalls notwendige Erneuerung der Hausanschlussleitung entfällt• Ökonomische Flexibilität bei stark schwankenden Energiepreisen• Geringere Belastung des Stromnetzes an besonders kalten Tagen• Lagerbarer Brennstoff für Spitzenlastdeckung möglich, mittelfristig auch aus biogenem oder solarem Ursprung• Höhere Flexibilität und Resilienz der Energieversorgung• Mittelfristig könnte die Spitzenlast auch durch Brennstoffzellen gedeckt und damit ein Beitrag zur Deckung der Stromlücke im Winter geleistet werden	<ul style="list-style-type: none">• Zwei Wärmeerzeuger → Standardisierte Hybridlösung mit Wärmepumpe und Wandtherme, Verzicht auf Pufferspeicher• Höhere CO₂-Emissionen → dank optimierter Bivalenz-Regelung wird Spitzenlastanteil auf unter 10% reduziert• Höhere Installations- und Wartungskosten → Reduktion dank Standardlösung und Wartungsangebot aus einer Hand• Gasnetz nach wie vor erforderlich → lagerbare erneuerbare Brennstoffe zur Spitzelastdeckung nutzen

Quelle: Dieses Projekt

5.1.2 Bivalenzregelung

Obwohl eine bivalente Wärmepumpe typischerweise nur 50% des Leistungsbedarfs deckt, kann sie bis 90% des jährlichen Wärmebedarfs decken (siehe Abbildung 2). Dies liegt daran, dass der normative Heizleistungsbedarf mit Sicherheitszuschlägen ermittelt wird und gleichzeitig die Winter zunehmend milder werden. Eine Spitzenlastdeckung muss trotzdem installiert werden, denn auch künftig sind Kälteperioden mit Temperaturen von unter -10°C während mehrerer Tage zu erwarten, auch wenn solche Wetterlagen voraussichtlich immer seltener auftreten werden.

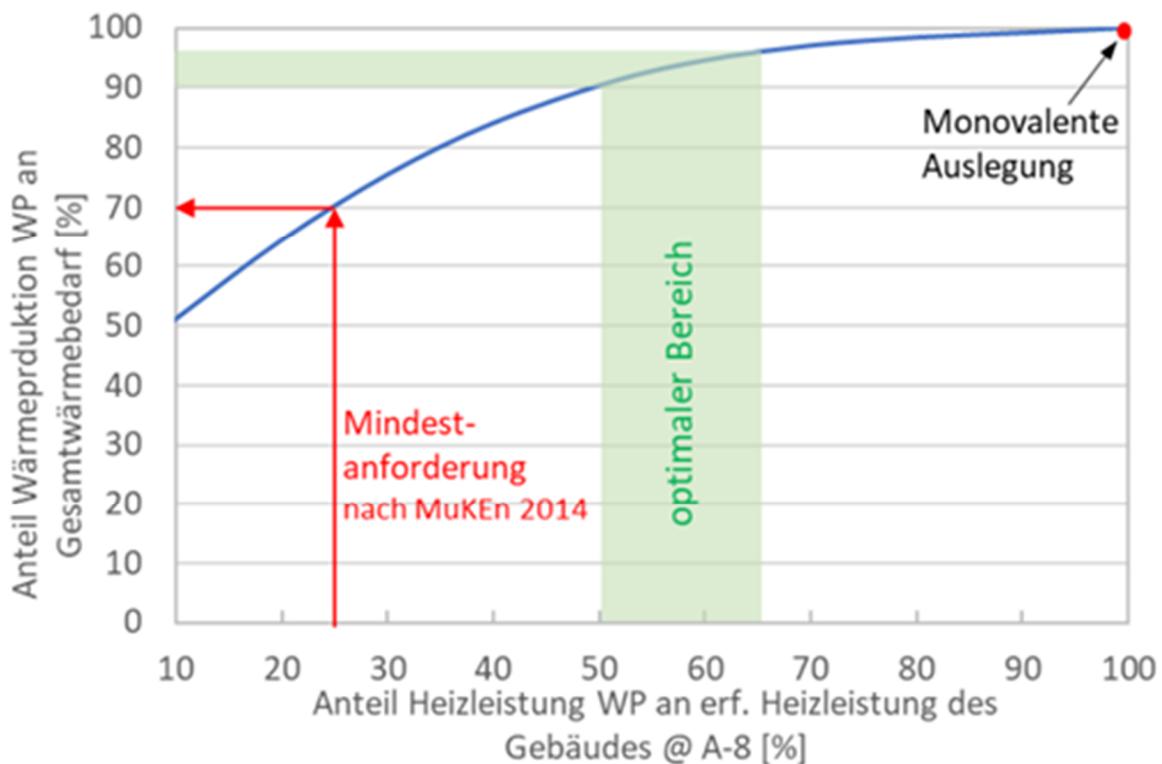


Abbildung 8 Leistungs- und Energieanteil bivalenter Wärmepumpen: Quelle: (Gasser, 2019)

Die Auswertung basierend auf dem Jahr 2018 zeigt hierbei folgendes auf: 2018 war eher warm und entspricht damit einem typischen Jahr, wie wir es in Zukunft erwarten dürfen. 2018 war allerdings Ende Februar bis Anfang März besonders kalt und im Frühling und Herbst eher warm. Der Grundlastanteil könnte folglich in kalten Jahren sogar noch steigen. Das Jahr 2018 enthält auch eine besonders kalte Periode (Jan bis März) und damit wird aufgezeigt, dass diese Lösung auch in kalten Wintern funktioniert (siehe Abbildung 9).

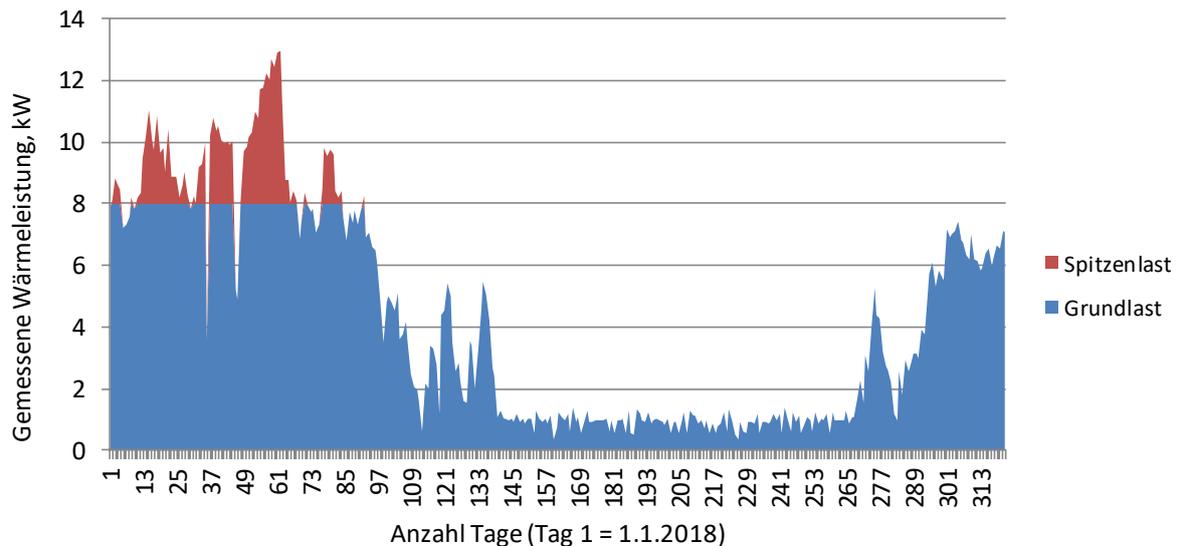


Abbildung 9 Auswertung der gemessenen Wärmeleistung einer Luft/Wasser-Wärmepumpe mit einer Nennleistung von 16 kW bei A-8/W55; mit einem Leistungsanteil von 50% (8 kW) hätte die Luft/Wasser-Wärmepumpe im Jahr 2018 92% des Wärmebedarfs gedeckt

Arbeitshypothesen zur Bivalenzregelung

Der Energieanteil des Spitzenlastsystems bei einem Leistungsanteil von 50% kann auf 10% vom Energieanteil reduziert werden. Dafür muss die Wärmespeicherung des Gebäudes besser ausgenutzt werden, indem zum einen die Leistung der Wärmepumpe immer möglichst voll abgerufen wird (leichtes Überheizen des Gebäudes oberhalb des Bivalenzpunktes) und zum anderen das Spitzenlastsystem erst mit grosser Verzögerung zugeschaltet wird (leichte Unterkühlung des Gebäudes unterhalb des Bivalenzpunktes).

Der Energieanteil der Spitzenlast kann weiter reduziert werden, wenn die Einschaltverzögerung des Spitzenlastsystems mit einem modellbasierten, prädiktiven und selbstlernenden Regler dynamisch an die langfristig benötigte Heizlast angepasst wird. Wenn z.B. gemäss Wetterprognose nach einer kurzen Kälteperiode wärmere Tage folgen, kann die Einschaltverzögerung entsprechend verlängert werden. Alternativ kann auch die maximale Leistung des Spitzenlastsystems dynamisch begrenzt werden.

Der Energieanteil der Spitzenlast kann weiter reduziert werden, wenn der mechanisch geförderte Aussenluftvolumenstrom berücksichtigt und gesteuert und z.B. bei tiefen Aussen-temperaturen reduziert wird (siehe Teilprojekt Abluftanlage).

Durch die Klimaerwärmung wird der Energieanteil der Spitzenlast in den kommenden Jahren weiter sinken. Bivalente Wärmepumpen werden somit gegenüber monovalenten Lösungen aus ökonomischer und ökologischer Sicht immer interessanter.

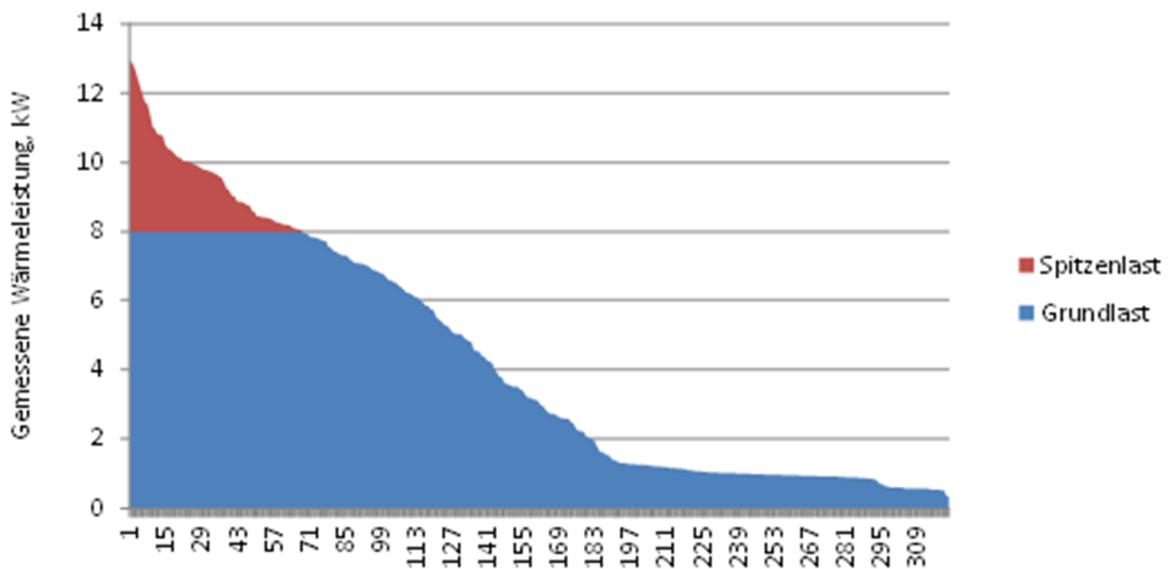


Abbildung 10 Summenhäufigkeit der gemessenen Heizleistung mit Aufteilung in Grundlast und Spitzenlast bei bivalent-parallelem Betrieb

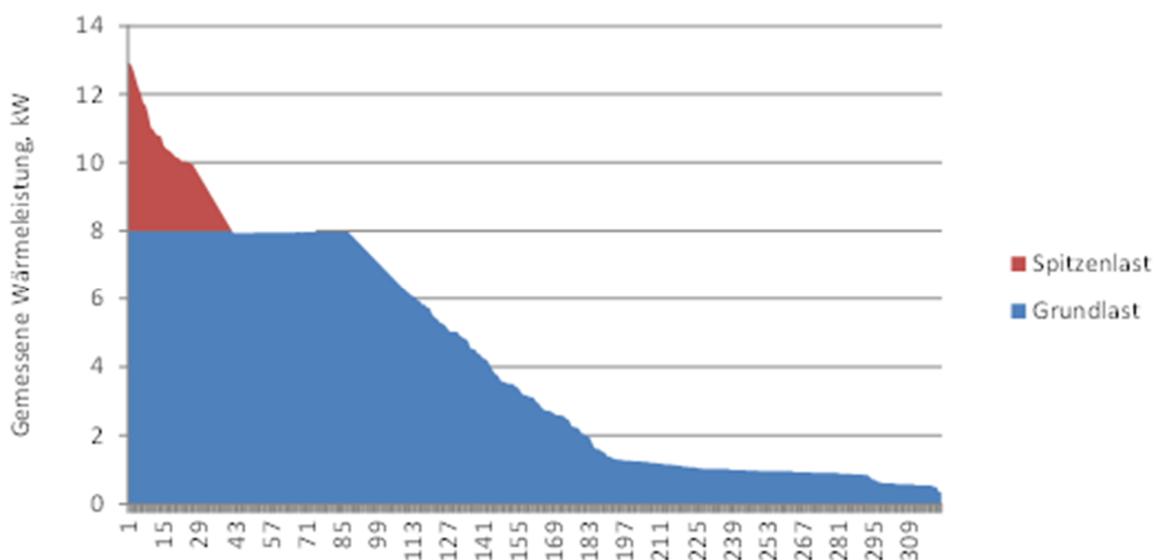


Abbildung 11 Modifizierte Summenhäufigkeit der Heizleistung mit optimierter Bivalenzregelung: durch Erhöhung der Einschaltverzögerung und/oder prädiktiver Bivalenzregelung wird der Deckungsgrad der Grundlast erhöht, jener der Spitzenlast reduziert.

In der praktischen Umsetzung solcher Konzepte ist zu berücksichtigen, dass bivalente Anlagen inhärent hohe Anforderungen an Betrieb und Unterhalt stellen. Aus diesem Grund ist ein sorgfältiges und regelmässiges Energiemonitoring beim Einsatz von bivalenten Systemen – und zwar auf Anlagenebene - zwingend erforderlich. Nur so kann gewährleistet werden, dass allfällige Fehlfunktionen rechtzeitig erkannt und behoben werden können. Dies ist v.a. bei

der Verwendung von fossilen Energieträgern zur Spitzenlast sehr wichtig, damit unnötige CO₂-Emissionen vermieden werden können.

5.1.3 Aufstellungsort

Im dicht bebauten Siedlungsraum in Kernstädten und deren Agglomeration ist das grösste Hindernis für Luft-Wärmepumpen meist, dass kein geeigneter Aufstellungsort zur Verfügung steht (siehe dazu auch die im GIS durchgeführte Parameterstudie im Kap. 7.1). Eine systematische Analyse möglicher Aufstellungsorte für Luft-Wasser-Wärmepumpen in bestehenden städtischen Gebäuden ist in der Studie Gasser (2019) zu finden. Dabei werden fünf Lösungsansätze mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen unterschieden (siehe auch Abbildung 12):

1. Aussenaufstellung der Wärmepumpe im Garten / Aussenbereich
2. Innenaufstellung der Wärmepumpe im Keller / Erdgeschoss
3. Innenaufstellung der Wärmepumpe im Dachstock
4. Aussenaufstellung der Wärmepumpe auf Dach – Splitbauweise
5. Aussenaufstellung der Wärmepumpe auf Dach – Kompaktbauweise

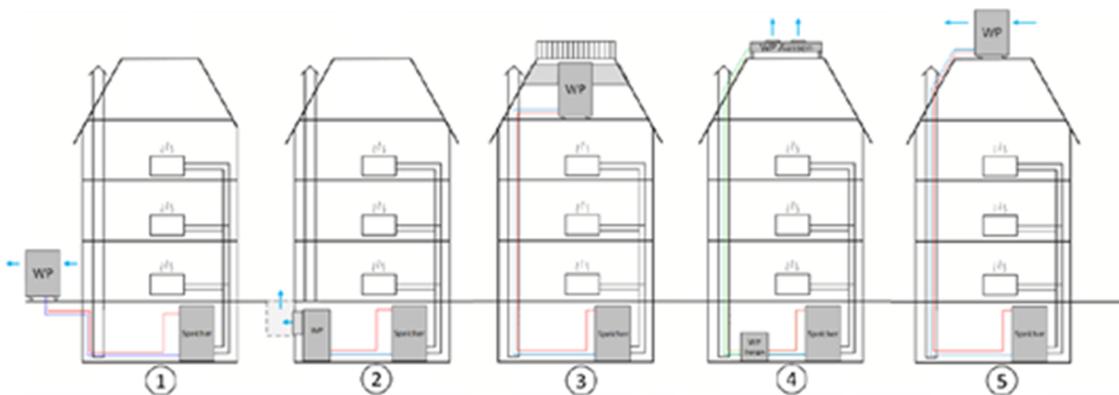


Abbildung 12 Lösungen für die Aufstellung von Luft/Wasser-Wärmepumpen; Quelle: Gasser (2019)

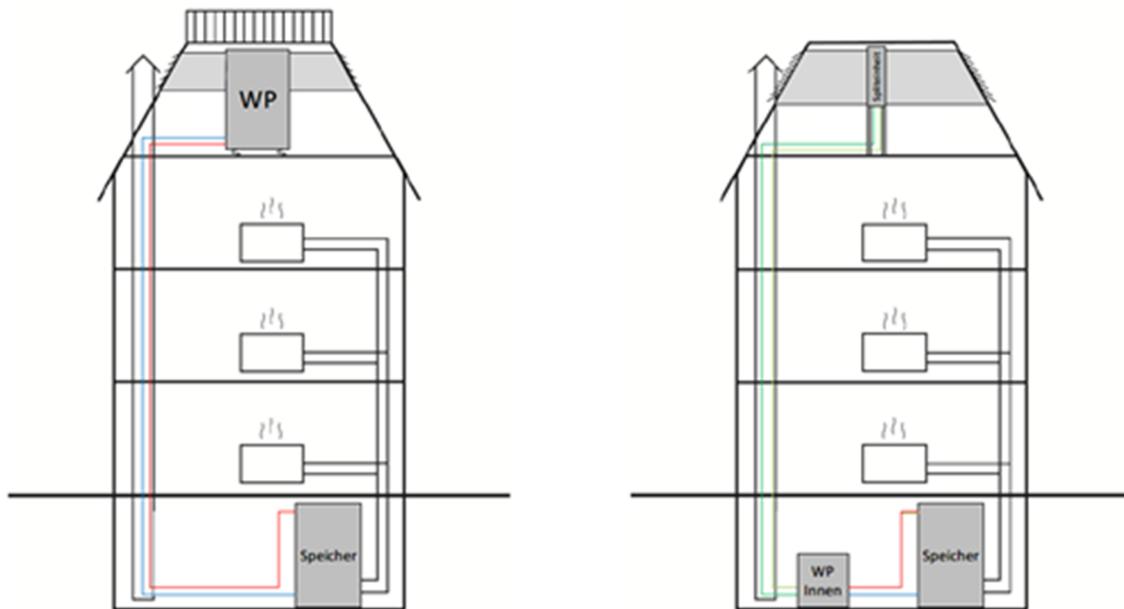


Abbildung 13 Aufstellung einer Luft/Wasser-Wärmepumpe im Dachstock: links in Kompaktbauweise, rechts in Split-Bauweise; Quelle: Gasser (2019)

5.1.4 Kostenkennwerte

Die Kostenanalyse der fünf Aufstellungsorte anhand von Testplanungen und realisierten Projekten zeigt, dass bei bestehenden Gebäuden die Lösungen 1 und 2 in aller Regel die günstigsten und meist auch die einzig realisierbaren Varianten sind. Bei der Lösung 2 (innen aufgestellte WP) wird die maximale Leistung allerdings meist durch die beschränkten Platzverhältnisse für die Luftführung beschränkt. Bei Neubauten sind aber schon kaskadierte, innenaufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpen mit bis zu 100 kW Heizleistung realisiert worden. Zu beachten sind in beiden Fällen die Einhaltung der Lärmvorschriften bzw. die Vermeidung von unnötigem Lärm gemäss dem Vorsorgeprinzip. Bei der Lösung 2 sind sowohl Schallemissionen im Inneren des Gebäudes (inkl. Körperschall) als auch solche beim Luftschacht zu beachten. In beiden Fällen ist sowohl das eigene Gebäude vor übermässigen Lärmemissionen zu schützen wie auch die benachbarten Gebäude.

Die Lösung 3 scheitert meist an den hohen Kosten für die Integration im Dachstock. Nebst der Leitungsführung der Wärme zwischen WP und Speicher bzw. Heizverteiler sind auch hier Körperschall und zudem Statik mögliche Kostentreiber (bei den MFH der Bauperioden bis Ende der 1940er Jahre handelt es sich bei Decken gegen Dachraum um Holzdecken, bei den späteren Bauperioden ist der Dachraum eher klein/niedrig (1960er und 1970er bzw. wird zu Wohnzwecken genutzt (ausgebautes Dachgeschoss mit hohen Räumen (1980er Jahre))).

Die Lösung 4 und 5 ist bei Flachdächern eine Option. Bei Dachsituationen mit Attikageschoss oder Dachterrassen können u.U. die Platzverhältnisse nicht ausreichend sein. Zu beachten sind ebenfalls die Schallemissionen (auch in diesen Situationen sind die Bestimmungen zum Schutz der Nachbargebäude einzuhalten, was insbesondere in Blockrandbebauungen nicht immer einfach sein dürfte). Bei dieser Gebäudetypologie sind auch bei der Dachterrasse als Aufstellungsort Körperschallaspekte zu beachten. Dies gilt auch für MFH mit reinen

Flachdächern der 1950er bis 1970er Jahre (ausgeführt als Betondecken), da während dieser Bauperiode dem Schallschutz noch nicht dieselbe Bedeutung beigemessen wurde wie später.

Die folgenden Ausführungen fokussieren auf die «klassischen» Aufstellungsorte 1 und 2. Ab ca. 25 kW sind in diesen Fällen bivalente Luft/Wasser-Wärmepumpen günstiger als monovalente Anlagen (siehe Abbildung 8). Entscheidender als die Kosteneinsparungen sind aber der geringere Platzbedarf und die reduzierten Lärmemissionen (gilt für Lösungen 1 und 2).

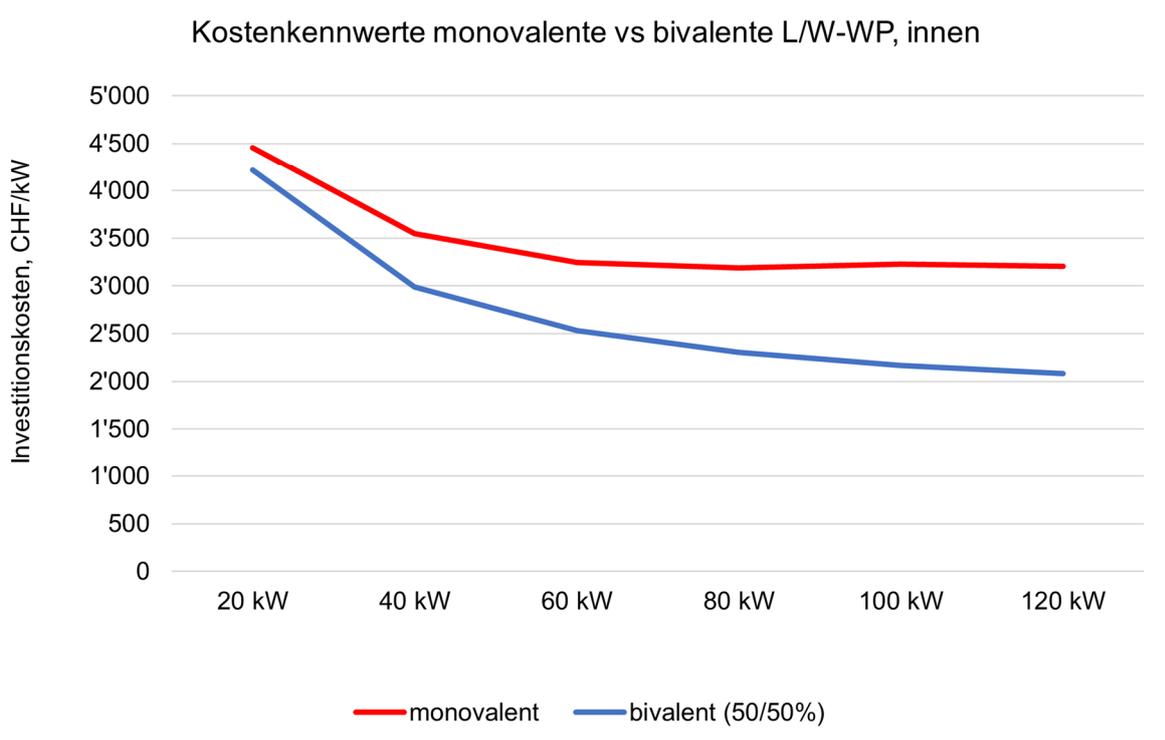
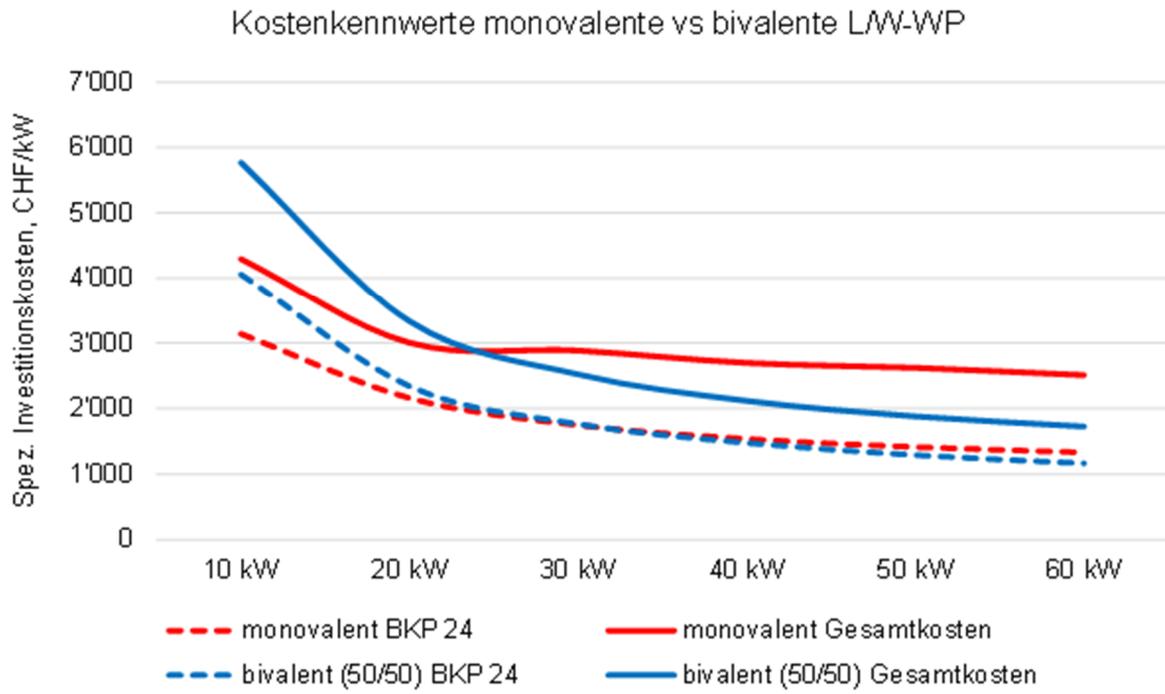


Abbildung 14 Kostenkennwerte für monovalente versus bivalente Luft/Wasser-Wärmepumpen

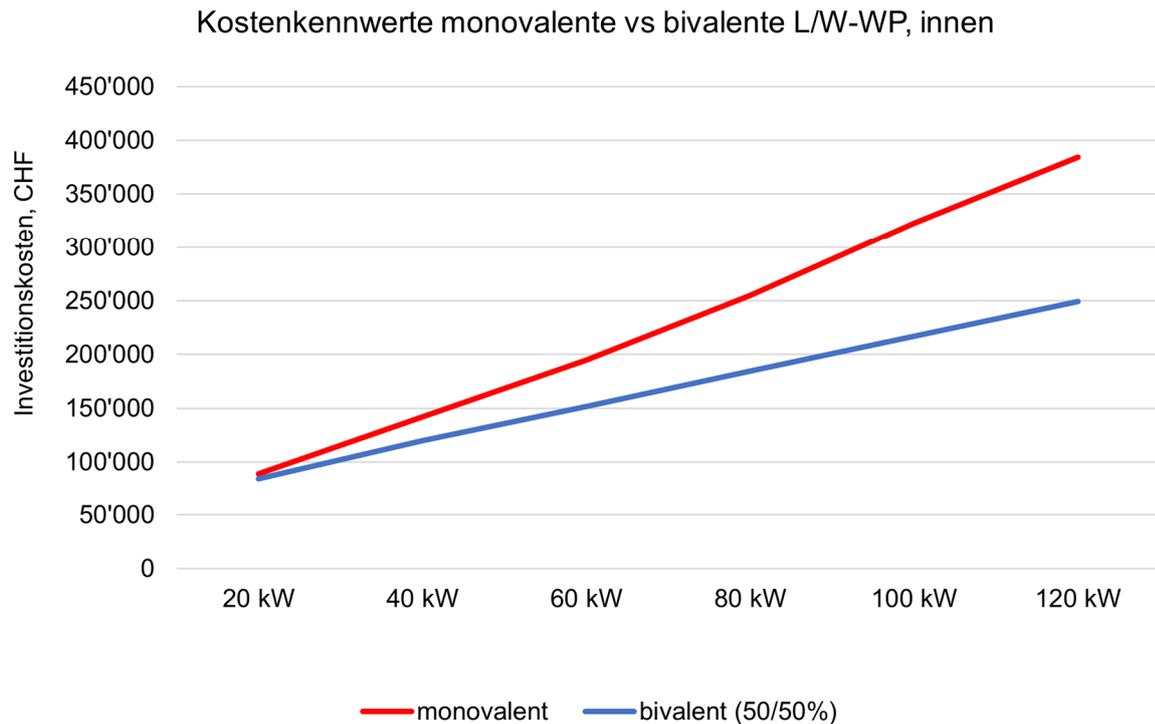


Abbildung 15 Kostenkennwerte für monovalente versus bivalente Luft/Wasser-Wärmepumpen; absolute Kosten

5.1.5 Energiekosten und Umweltkennwerte

Bevor auf den Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen monovalenten und bivalenten Luft/Wasser-WP eingegangen wird (Kap. 5.1.6), werden zunächst die Energiekosten und Umweltkennwerte der bivalenten Systeme mit unterschiedlichen Spitzenlastenergieträgern betrachtet. Bzgl. ersterer ist festzustellen, dass sich die Jahresenergiekosten nur relativ wenig unterscheiden (innerhalb von 2 CHF/m², siehe Abbildung 16), dies nicht zuletzt, weil die Spitzenlast in unseren Konzepten nur 10% Energieanteil abdeckt.

Bei den direkten CO₂-Emissionen wird mit einem energetischen Spitzenlastanteil von 10% der postulierte Grenzwert von 6 kg CO₂ / m² bei den beiden fossilen Energieträgern Öl und Erdgas eingehalten, siehe Abbildung 17.

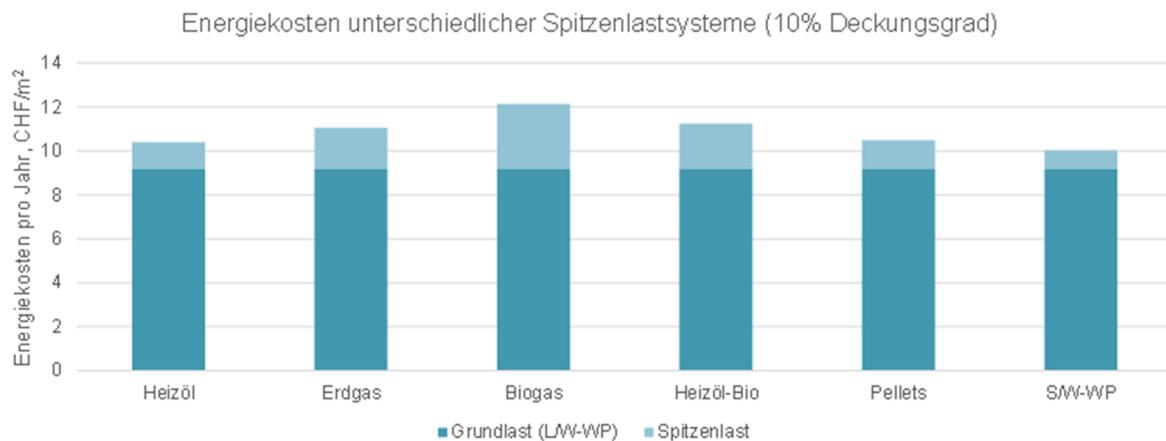


Abbildung 16 Jährliche Energiekosten mit unterschiedlichen Spitzenlastsystemen; Deckungsgrad der Spitzenlast: 10%

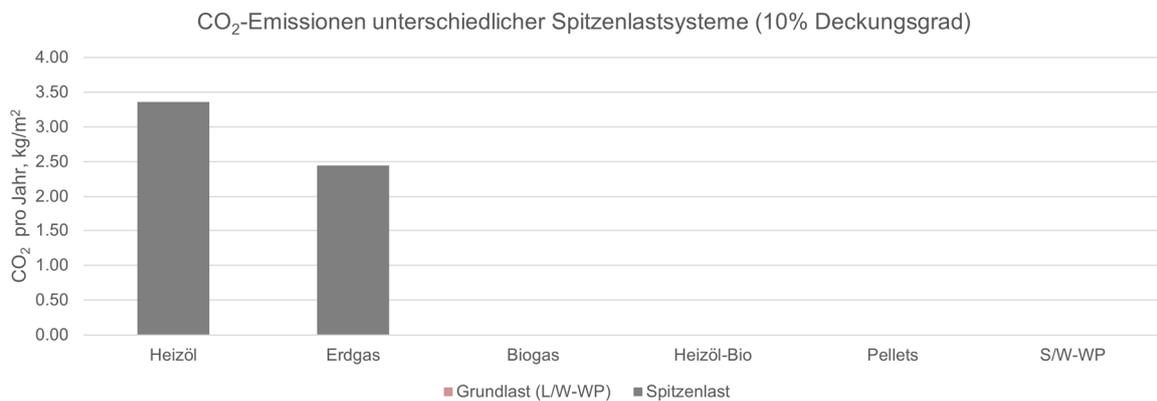


Abbildung 17 Jährliche CO₂-Emissionen gemäss CO₂-Gesetz mit unterschiedlichen Spitzenlastsystemen; Deckungsgrad der Spitzenlast: 10% (Annahme Q_{hw} = 120 kWh/m²)

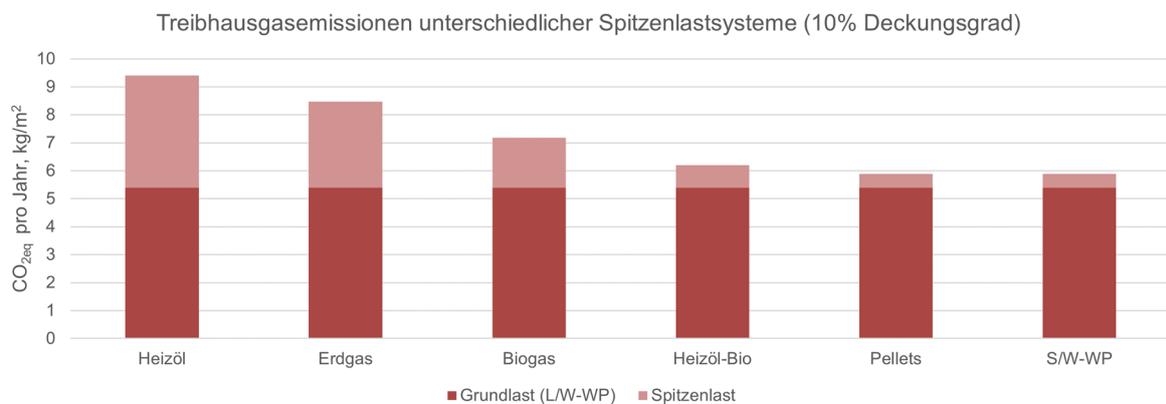


Abbildung 18 Jährliche Treibhausgasemissionen gemäss KBOB:2014 mit unterschiedlichen Spitzenlastsystemen; Deckungsgrad der Spitzenlast: 10%

5.1.6 Wirtschaftlichkeitsvergleich

Der Vergleich der Investitions- und Lebenszykluskosten zwischen monovalenten und bivalenten Luft/Wasser-WP erfolgt an einem generischen Fallbeispiel eines MFH mit einer EBF von 900 m² und einem Nutzenergiebedarf für Heizen und Warmwasser (Q_{HW}) von 120 kWh/m² mit einem Wärmeleistungsbedarf von rund 50 kW (siehe Tabelle 20 für weitere Details).

Beim Bivalenzsystem gehen wir davon aus, dass der bereits bisher genutzte Energieträger verwendet wird, also Öl oder Gas.

Sowohl für das monovalente als auch für das bivalente System werden bzgl. Leistungsdimensionierung zwei Fälle unterschieden: Standard (entspricht der 90%-Kennlinie von prSIA 384/1) und optimiert (entspricht dem Mittelwert zwischen der 90%-Kennlinie und der 50%-Kennlinie). Aus diesem generischen Vergleich ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Die spezifischen Investitionskosten betragen im Standardfall der monovalenten Anlage rund 160 CHF/m² und lassen sich im bivalenten Fall auf rund 120 CHF/m² reduzieren. Dies kann für sich genommen als Low-Invest-Cost Solution bezeichnet werden, welche auch den Grenzwert der direkten Emissionen von 6 kg CO₂ pro m² einhält (siehe Abbildung 17).
- Durch eine Optimierung bei der Dimensionierung lassen sich die Kosten weiter senken (um rund 20 bis 25 CHF/m²), wobei hier eine genaue Analyse des Wärmeleistungsbedarfs des Gebäudes notwendig ist, z.B. indem die Leistungskennlinie durch manuelle oder automatisierte Messung empirisch bestimmt wird (gemäss prSIA 384/1, Ziffer 4.2.8).
- Die bivalente Lösung ist auch bzgl. der gesamten Jahreskosten günstiger als die monovalente Wärmepumpe; die Differenz macht 1.5 bis 2 CHF/m² aus.

**Tabelle 20: Energetische Kennwerte sowie Investitions- und Lebenszykluskosten von mono-
valenten und bivalenten Luft/Wasser-WP im Vergleich.**

		Monovalent (L/W)		Bivalent (LICS)	
		Standard	Optimiert	Standard	Optimiert
Energie und Leistung					
Energie	kWh/m ²	120	120	120	120
Volllaststunden	h	2200	2600	2200	2600
Leistung	W/m ²	55	46	55	46
Wärmeerzeugung (WE)					
Investitionskosten (leistungsspezifisch)	CHF/kW	3000	3000	2200	2200
Installierte Leistung	W/m ²	55	46	55	46
Investitionskosten (flächenspezifisch)	CHF/m ²	164	138	120	101
Annuität		5.7%	5.7%	5.7%	5.7%
Jahreskosten (WE)	CHF/m²	9.4	7.9	6.9	5.8
Energiekosten					
Jahresarbeitszahl (JAZ)	-	2.8	2.8	2.8	2.8
Jahresnutzungsgrad (JNG) Bivalenzsystem				0.9	0.9
Stromverbrauch WP	kWh/m ²	43	43	39	39
Bivalenz-Energieverbrauch (Anteil 10%)	kWh/m ²			13	13
Strompreis	CHF/kWh	0.237	0.237	0.237	0.237
Bivalenz-Energiepreis	CHF/kWh			0.11	0.11
Stromkosten WP	CHF/m ²	10.2	10.2	9.1	9.1
Energiekosten Bivalenzsystem	CHF/m ²			1.5	1.5
Energiekosten gesamt	CHF/m²	10.2	10.2	10.6	10.6
Jahreskosten gesamt	CHF/m²	19.5	18.1	17.5	16.4

Quelle: Berechnungen TEP Energy und LTL

5.2 Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Erdreich-Spitzenlastdeckung

Anstelle von Brennstoffen kann die Spitzenlast auch durch Erdwärmesonden, Erdwärmeregister oder Erdwärmekörbe gedeckt werden. Dank dem bivalenten Betrieb muss der Erdwärmespeicher nur für zwei bis drei Wochen Volllast ausgelegt werden. Investitionskosten und Platzbedarf fallen entsprechend deutlich tiefer aus. Anstelle von direktverdampfenden Wärmepumpen kommen auch Sole/Wasser-Maschinen in Frage. Über den Rückwärmer⁹ kann auch das Erdreich regeneriert werden, sobald die Aussentemperaturen genügend hoch über der Austrittstemperatur des Erdwärmespeichers liegen. Die lärmschutz- und regelungstechnischen Lösungsansätze von AP2 kommen auch hier zum Tragen.

⁹ Der Rückwärmer entzieht der Aussenluft Wärme; wird auch als Rückkühler oder Luftkühler bezeichnet.

Noch wenig erforscht ist bei diesem Konzept das Verhalten des Erdreichs bei einer zeitlich begrenzten sehr hohen thermischen Belastung, mit spezifischen Wärmeentzugsleistungen im Bereich von 50 bis 60 W pro Meter Erdsonde oder Erdregister. Simulationen mit einem Erdsondenprogramm (EWS) haben gezeigt, dass bereits eine Belastung von 55 W Wärmeentzugsleistung pro Meter Erdsonde über zwei Wochen zu unzulässig tiefen Soletemperaturen ($< -3^{\circ}\text{C}$ Sondeneintrittstemperatur) führen kann. Eine Spitzenlastdeckung mit Erdwärme kann daher bei längeren Kälteperioden riskant sein und muss mit entsprechenden Sicherheitszuschlägen geplant werden, was sich negativ auf die Anlagekosten auswirkt.

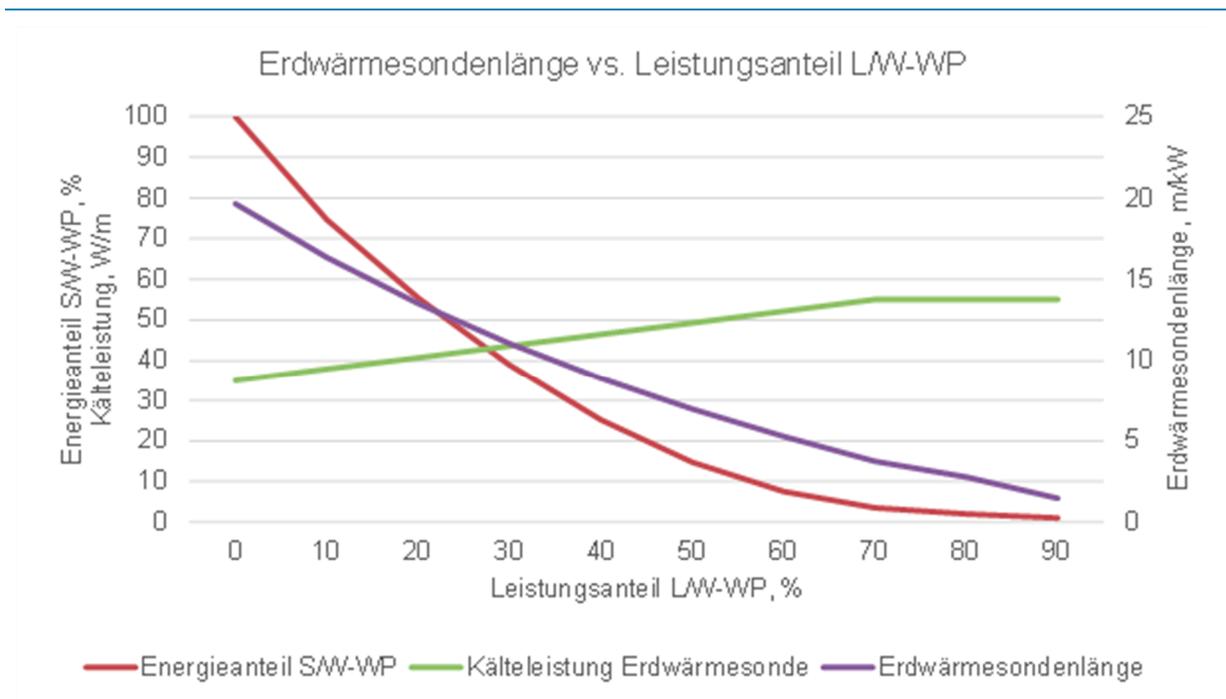


Abbildung 19 Benötigte Erdwärmesondenlänge pro kW der gesamten bivalenten Heizungsanlage in Funktion des Nennleistungsanteils der L/W-WP

Erdwärmesonden zur Spitzenlastdeckung sind trotz Reduktion der benötigten Bohrmeter deutlich teurer als eine Spitzenlastdeckung mit Biogas oder Heizöl-Bio (siehe Abbildung 20). Diese Lösung ist daher als reine Heizungsanlage wenig attraktiv.

Dies ändert sich, wenn im Sommer ein Kühlbedarf besteht. Die Erdsonden oder Erdregister können im Sommer als Wärmesenke für das Freecooling genutzt werden. Auf eine konventionelle Kälteerzeugung kann bei geringem spezifischem Klimakältebedarf ($< 10 \text{ kWh/m}^2$), verzichtet werden, wodurch sich die höheren Kosten dieser Lösung eher amortisieren lassen bzw. wegen des Zusatznutzens in Kauf genommen werden.

Für bestehende Wohngebäude mit einem geringen Wärmeschutz der Gebäudehülle, einem eher niedrigen Fensteranteil der Fassade und einem entsprechend geringen Klimakältebedarf dürfte aber eine Wärme-Spitzenlastdeckung mit Erdwärme in der Regel zu aufwendig sein.

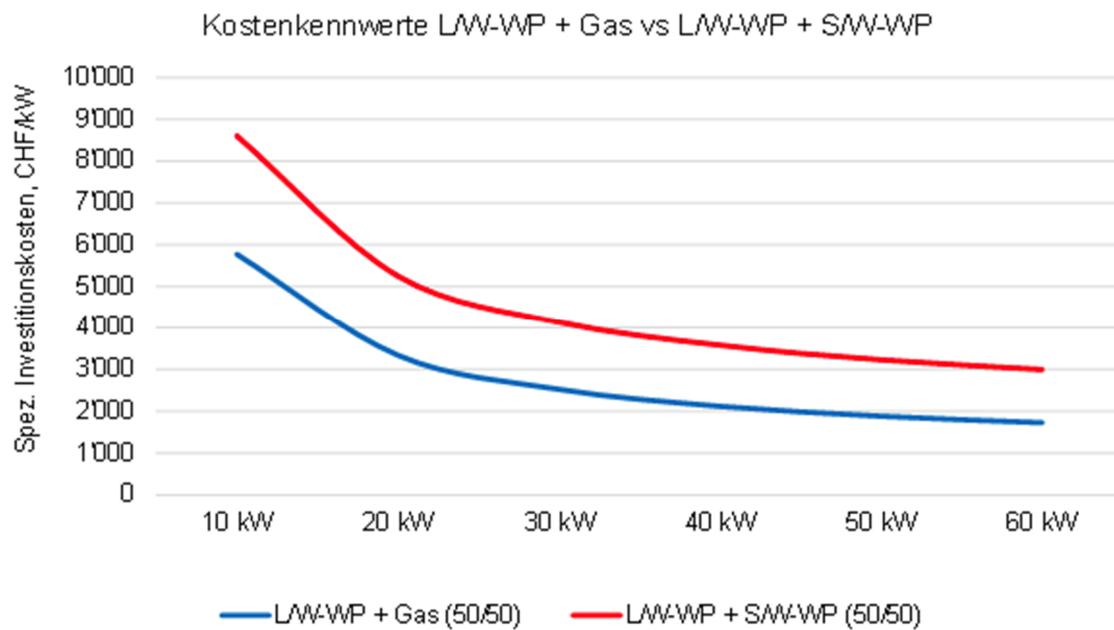


Abbildung 20 Kostenkennwerte von Luft/Wasser-Wärmepumpen mit Gas oder Sole/Wasser Spitzelast

5.3 Senkung der Vorlauftemperatur durch wärmeabgabeseitige Massnahmen

Der Einbau einer Fussbodenheizung kommt im Umbau aus Kostengründen, zur Vermeidung einer Leerräumung der Wohnungen oder wegen der Umtriebe bei belegten Wohnungen oft nicht in Frage. Nach dem Ersatz der Fenster, Wärmedämmung von Estrichboden und Kellerdecke sowie Deaktivierung der Nachtabsenkung sind Vorlauftemperaturen von 55°C trotzdem auch bei Radiatoren möglich, in gewissen Fällen auch tiefere. Jahresarbeitszahlen über 3.0 sind dann mit heutigen Luft/Wasser-Wärmepumpen erreichbar. Nicht selten wird aber die Absenkung der Vorlauftemperatur durch einzelne kritische Räume oder Heizgruppen limitiert. Auch Primas et al. (2014) kamen zum Schluss, dass ein «beträchtliches energetisches Optimierungspotential bei der Auslegung der Abgabesysteme besteht», u.a. gestützt auf WP-Feldmessungen.

5.3.1 Nachrüstung mit Niedertemperatur-Wärmeabgabesystemen

Eine punktuelle Nachrüstung der Wärmeabgabe mit Niedertemperatur-Wärmeabgabesystemen sowie praktikable und standardisierte Lösungen zu deren Einbindung in bestehende Heizverteilsysteme bilden den Schlüssel zur Erreichung tiefer Vorlauftemperaturen in Umbauten ohne Fassadendämmung und Fussbodenheizung. Die Vielfalt von Niedertemperatur-Wärmeabgabesystemen ist gross und reicht von grossflächigen Heizkörpern über Konvektoren und Heizkörpern mit integrierten oder nachgerüsteten Lüftern (siehe Beispiele in der nachfolgende Abbildung 21) bis hin zu Decken- und Wandheizpanelen. Die diversen Varianten haben je ihre Vor- und Nachteile (z.B. Platzbedarf von grossflächigen Radiatoren, hohe

Leistungsabgabe, aber erforderliche Stromversorgung, Lärm- und Staubentwicklung bei Konvektoren), welche fallweise abzuwägen sind. Welche Vorlauf-Temperaturen mit welchen wärmeabgabeseitigen Massnahmen letztlich erreicht werden, hängt von den Gegebenheiten ab, auch was den Grad der Überdimensionierung der Heizkörper zum Zeitpunkt der Gebäudeerstellung betrifft.



Abbildung 21 Beispiele Niedertemperaturwärmeabgabesysteme (Kriesi, 2013; Viessmann, 2011)

Das Potenzial, die typischen Kosten und die noch zur erschliessenden Kostenoptimierungspotentiale solcher verteilseitigen Massnahmen wurden anhand bestehender Studien und durch den Austausch mit Lieferanten von innovativen Niedertemperatur-Wärmeabgabesystemen aufgearbeitet. Ausgegangen wird hierbei von den Arbeiten von Primas et al. (2010), siehe Abbildung 22. Kostentreibend wirkt, dass die Wärmeabgabeleistung bei gegebenem Radiator degressiv ist, v.a. in Richtung sehr tiefen Vorlauftemperaturen (siehe Abbildung 23). Auswertungen von Preislisten haben ergeben, dass die Preise der Heizkörper eher etwas tiefer liegen als in Abbildung 22 angegeben, v.a. auch was die Heizkörper mit Lüftern betrifft. Zu diesen Preisen hinzuzählen sind die Kosten für deren Installation inkl. allfällige bauseitige Arbeiten. Bei einer VL-Temperatur von 55°C gehen wir von Kosten von 2000 CHF/kW (2 CHF/W) aus und bei einer von 45°C von solchen von 2600 CHF/kW. Für eine um weitere 10°C tiefer VL-Temperatur steigen die Kosten überproportional an auf 4000 CHF/kW (siehe Tabelle 21).

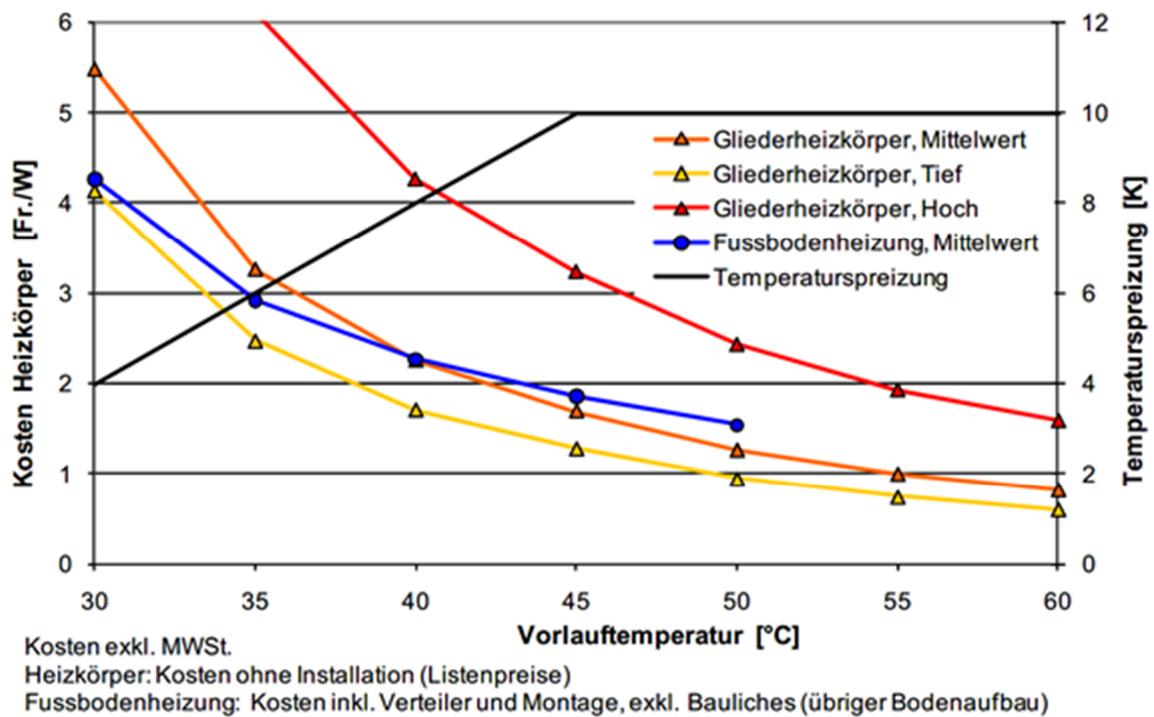


Abbildung 22 Kostenkennwerte für Heizkörper im Vergleich zu Fussbodenheizungen; Quelle: Primas et al. (2010)

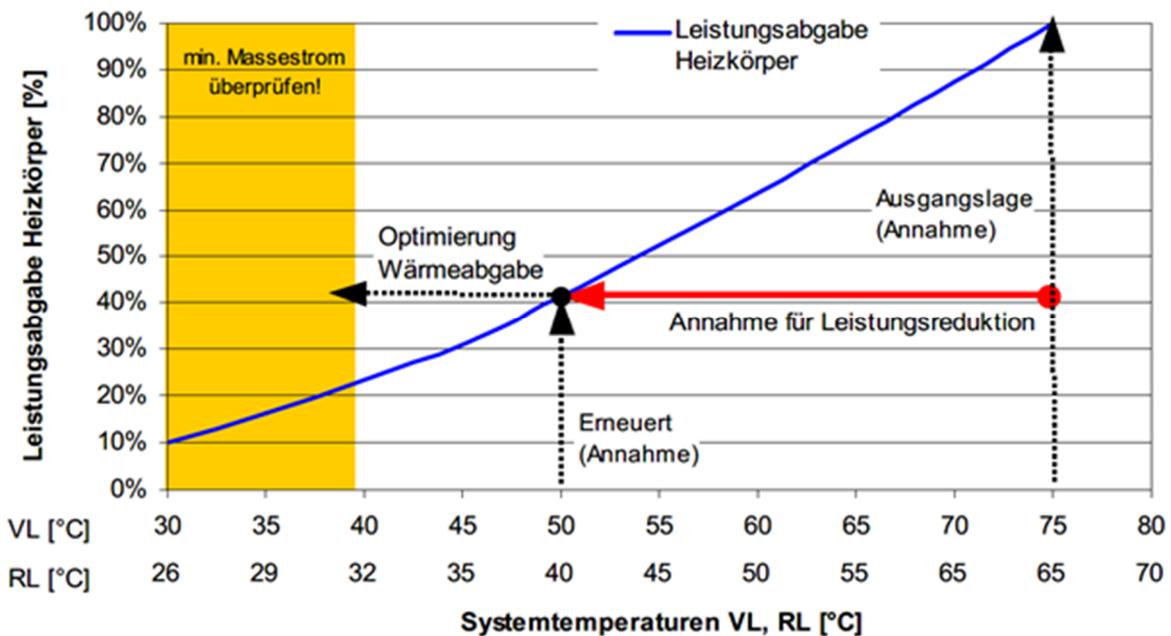


Abbildung 23 Anhängigkeit der Leistungsabgabe von der Vorlauftemperatur. Quelle: Primas et al. (2010)

Die Absenkung der Vorlauftemperaturen hat auch bei Feuerungsanlagen einen positiven Effekt, wenn damit der Kondensationsanteil erhöht oder maximiert werden kann. Noch wich-

tiger ist eine tiefe Vorlauftemperatur aber bei Wärmepumpen. Eine tiefe Vorlauftemperatur erhöht den COP im Dimensionierungsfall (und damit den elektrischen Leistungsbedarf) und die Jahresarbeitszahl. Bei gleichbleibendem WP Gütegrad kann der Effekt über die Verbesserung des Carnot-Wirkungsgrades ($1 - T_0/T_{VL}$) abgeschätzt werden. Hierbei ist die Abhängigkeit der gewichtet gemittelten Vorlauftemperatur von der max. Vorlauftemperatur zu berücksichtigen, z.B. mittels Summenhäufigkeit oder gemäss VDI 4650, siehe linkes Diagramm in Abbildung 24). Ein messtechnischer Zusammenhang wurde von Mellwig et al. (2021) basierend auf einer Felduntersuchung hergeleitet (siehe linkes Diagramm in Abbildung 24).

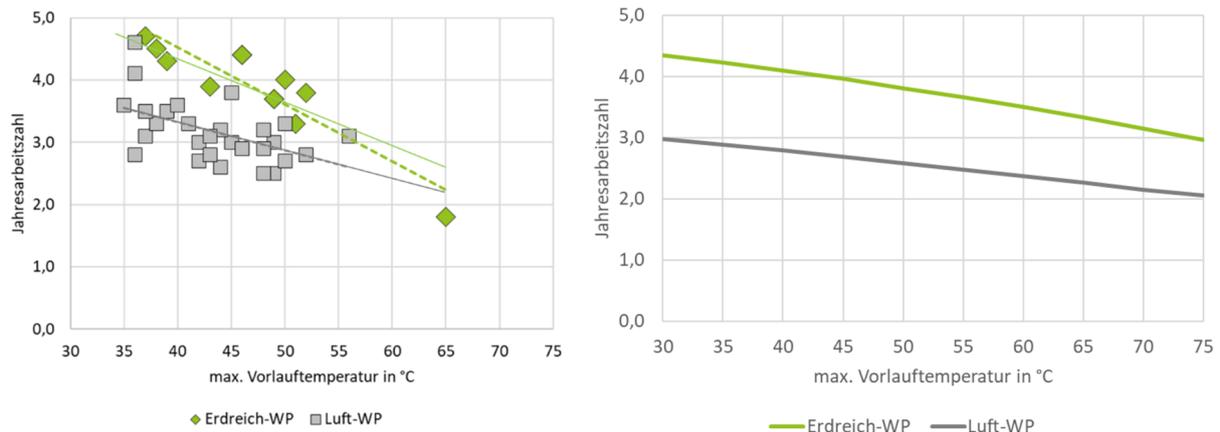


Abbildung 24 Jahresarbeitszahlen in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur (Quelle: Darstellung Mellwig et al. (2021) basierend auf Basis Fraunhofer ISE (2020), Ergänzung TEP Energy (linkes Diagramm))

Die resultierenden Investitionskosten, die energetische Wirkung und die sich ergebenden Jahreskosten werden an einem generischen Beispiel illustriert. Hierbei wird von einem Wärmebedarf für Heizen und Warmwasser von rund 140 kWh und 70 W/m² ausgegangen (2000 Volllaststunden). Wir veranschlagen, dass bei rund einem Viertel der EBF die Wärmeabgabe nachgerüstet werden muss, um die Vorlauftemperatur von ursprünglich 65°C um eine Differenz von 10 °C auf 55°C zu senken (für die Bemessung der Kosten wird davon ausgegangen, dass die Wärmeleistung im kritischen Raum 100 W/m² beträgt). Damit wird die JAZ bei den Erdwärmesonden-WP um 25% und bei den Luft/Wasser-WP um 20% gesteigert. Dafür sind Kosten von rund 50 CHF/m² erforderlich (auf die gesamte EBF bezogen).¹⁰ Bei einer Reduktion um weitere 10°C erhöhen sich die JAZ um etwa denselben prozentualen Beitrag. Allerdings ist davon auszugehen, dass dafür die Erneuerung von rund drei Vierteln der EBF wärmeabgabeseitig erforderlich ist, womit sich Investitionskosten von rund 130 CHF/m² ergeben, siehe Tabelle 21.

Wärmeabgabeseitige Massnahmen zur Reduktion der Vorlauftemperatur sind meist nur wirtschaftlich bzw. kostenneutral, wenn sie sich auf einige wenige Räume beschränken, siehe Tabelle 21 (die Jahreskosten werden mit der Annahme mit einer Diskontrate von 3% und

¹⁰ Für den Zusammenhang zwischen Vorlauftemperatur und JAZ wird hierbei vom linken Diagramm in Abbildung 24 ausgegangen, wobei die dünne durchgezogene Linie verwendet wird, welche den Ausreisser bei VL=65°C ignoriert; damit wird der Effekt der VL auf die JAZ nicht zu optimistisch eingeschätzt.

einer Lebensdauer von 30 Jahren der Wärmeabgabesysteme berechnet). Soll eine stärkere Reduktion der Vorlauftemperatur erreicht werden, steigen die Investitions- und auch die Jahreskosten an, bei 45°C um rund 80 CHF/m² (Investitionen) bzw. 3 CHF/m² (Jahreskosten).

Tabelle 21: Beispiel eines Wirtschaftlichkeitsvergleichs für wärmeabgabeseitige Massnahmen zur Reduktion der Vorlauftemperatur

		Erdwärmesonden-WP				Luft-Wasser-WP			
Vorlauftemperatur	°C	65	55	45	35	65	55	45	35
Quellentemperatur	°C	5	5	5	5	-8	-8	-8	-8
JAZ	-	2.7	3.4	4.1	4.8	2.2	2.7	3.1	3.6
Erhöhung JAZ	-		26%	52%	78%		20%	41%	64%
Wärmeabgabe									
Wärmeabgabe inkl. Installation	CHF/kW		2000	2600	4000		2000	2600	4000
Anteil EBF mit Erneuerung WA	%		25%	75%	100%		25%	75%	100%
Wärmeabgabe kritische Räume	CHF/m ²		200	260	400		200	260	400
Wärmeabgabe übrige Räume	CHF/m ²		120	156	240		120	156	240
Wärmeabgabe alle Räume	CHF/m ²		50	128	230		50	128	230
Annuität			5%	5%	5%		5%	5%	5%
Kapitalkosten WA	CHF/m²		2.6	6.5	11.7		2.6	6.5	11.7
Energiekosten									
Stromverbrauch WP	kWh/m ²	44	35	29	25	55	45	39	33
Strompreis	CHF/kWh	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.24	0.24	0.24
Energiekosten WP	CHF/m²	10.5	8.4	6.9	5.925	12.9	10.7	9.2	7.9
Jahreskosten gesamt	CHF/m²	10.5	10.9	13.5	17.7	12.9	13.3	15.7	19.6

Fazit: Falls mit gezielten Anpassungen der Wärmeabgabe in kritischen Räumen inkl. Nachjustierung der Heizkurve die Vorlauftemperaturen im Auslegungspunkt um 10°C gesenkt werden kann, erhöht sich die JAZ um 20% bis 25%. Die Massnahme ist bzgl. Jahreskosten in etwa kostenneutral und mit vergleichsweise geringen Investitionskosten (50 CHF/m²) verbunden und kann deshalb als Low-Invest-Cost-Solution bezeichnet werden. Weil die Jahreskosten von WP-Systemen häufig tiefer sind als diejenigen anderer Systeme, kann die Erneuerung der Wärmeabgabe sogar noch weiter gehen, ohne dass der Eigentümer in einer Jahresbetrachtung substanziell Mehrkosten zu gewärtigen hätte. Anzumerken ist, dass eine Absenkung der Vorlauftemperatur anspruchsvoll ist und nicht in allen Fällen mit rein punktuellen Massnahmen erreicht werden kann.

5.3.2 Weitere Massnahmen

Oft ist bei Altbauten besonders im Erdgeschoss die installierte Wärmeabgabeleistung zu gering und zwingt zu einer hohen Vorlauftemperatur. Durch Abdichtung der Aussentüren, Fenster und Kellertüren lassen sich die Lüftungsverluste kostengünstig reduzieren. Eine weitere mögliche Massnahme stellt der Rückbau der Wärmedämmung der Heiz-Rücklaufleitungen an der Kellerdecke dar. Dadurch kann die Temperatur der Kellerdecke bzw. des Bodens im Erdgeschoss um typischerweise 1 °C angehoben werden. Gleichzeitig sinkt die Rücklauftemperatur, was bei einer Wärmepumpe zu einem effizienteren Betrieb führt. Voraussetzung für diese Massnahme ist die Reduktion der Lüftungsverluste über offene Kellerfenster (siehe Kap. 5.4.3).

5.4 Kostengünstige Lüftungskonzepte

Der Einbau einer konventionellen Lüftungsanlage mit Zu- und Abluft und mit Wärmerückgewinnung in bestehenden Gebäuden ist aufwändig und kostenintensiv. Bei einem neuen Einfamilienhaus ist mit 14'000 bis 20'000 oder mehr und bei einem neuen MFH mit CHF 8'000 bis 18'000 pro Wohnung zu rechnen (Jakob et al., 2002, hausinfo, 2021). Dies entspricht umgerechnet je nach Grösse der EFH bzw. MFH spezifischen Investitionskosten von 80 bis 100 CHF/m² (EFH) bzw. 120 bis 160 CHF/m² (MFH-Wohnung). Der Einbau einer solchen Anlage in bestehende Gebäude kann je nach Situation mit bedeutenden Umtrieben und zusätzlichen Kosten verbunden sein, v.a. wenn dies nicht im Rahmen einer Gebäudegesamtsanierung erfolgt. Ist letzteres nicht der Fall, können die Kosten um 30% bis 50% höher liegen.

Da durch den Fensterersatz auch bei Umbauten der Bedarf für einen kontrollierten Luftaustausch steigt, sind investitionskostengünstigere Alternativen gesucht. Als Alternative zu einer zentralen Zu- und Abluftanlage betrachten wir zwei Ansätze:

- Fensterlüfter (aktive und passiv)
- Abluftanlagen

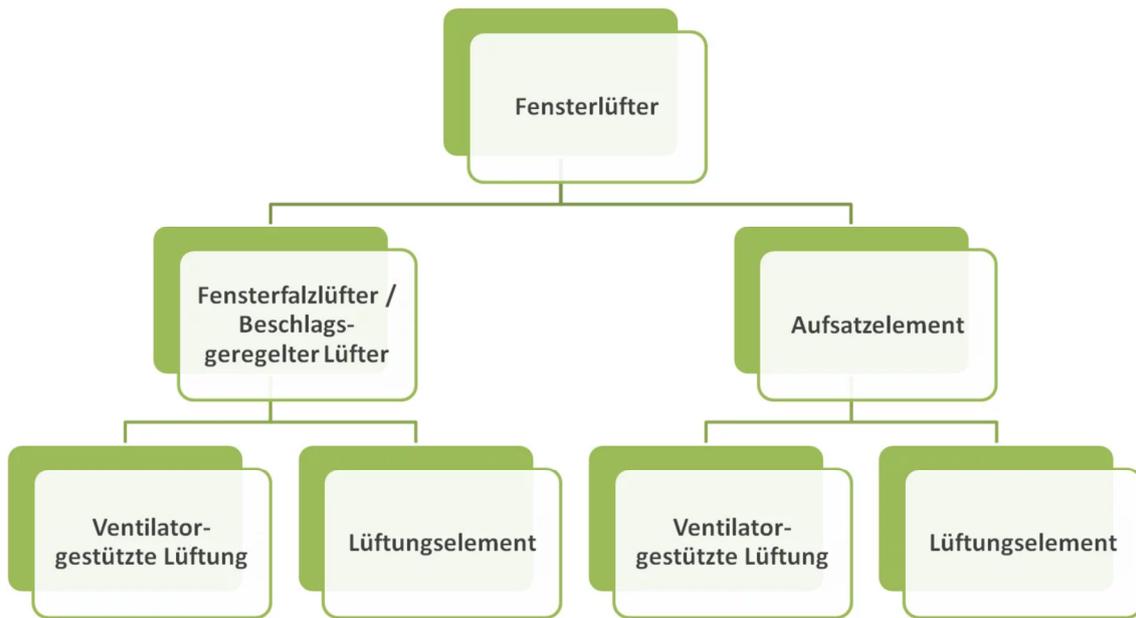
Eine Auswahl von kostengünstigen Lüftungskonzepten wird anhand von Fallbeispielen und Pilotanlagen mit bereits vorhandenen Messwerten und vorliegenden Investitions- und Betriebskostendaten dokumentiert. Die dabei vermuteten Entwicklungspotentiale werden durch Interviews mit Experten aus der Wärmepumpen- und Lüftungstechnik (Stiebel-Eltron, Aereco) plausibilisiert und quantifiziert.

5.4.1 Passive Fensterlüfter

Wenn aus baulichen Gründen oder wegen der Präferenz der Eigentümer Lüftungsanlagen nicht infrage kommen, bestehen trotzdem Möglichkeiten, den erforderlichen Luftwechsel auf energetisch effiziente Art sicher zu stellen. Dies kann z.B. durch passive oder aktive Fensterlüfter erfolgen. Darunter werden Systeme verstanden, die ohne den direkten Einfluss der Nutzenden den Luftaustausch sicherstellen, entweder ohne oder mit Ventilatorunterstützung.

Folgende Abbildung 25 zeigt eine Übersicht über verschiedene Ansätze von solchen passiven Fensterlüftern im Überblick.¹¹ Anzumerken ist hierbei, dass diese z.T. feuchte- und/oder CO₂-geregelt sind, d.h. dass der Luftaustausch bedarfsgerecht erfolgt (dies im Gegensatz zur manuellen Fensterlüftung, z.B. durch Ankippen der Fenster). Dies ist v.a. bei folgenden Nutzungen und Situationen von Bedeutung: Sanitäre Räume (besonders bei Ganztagesabwesenheiten der Bewohnenden), Schlafräume, Kellerräume.

¹¹ Unter <https://www.energie-experten.org/bauen-und-sanieren/fenster/fenstertechnik/fensterluefter> werden diese Systeme weitergehend beschrieben.



Gliederung von Fensterlüftern (Grafik: energie-experten.org)

Abbildung 25 Passiver Fensterlüfter im Überblick (Quelle: energie-experten.org (2022))

Je nach Funktionsprinzip erfolgt der Luftaustausch über den Fensterfalz, durch leichte Öffnung des Fensters mit einem motorischen Antrieb oder durch spezifische Elemente, die in die Fensterbrüstung, an die Fensterbrüstung oder in den Fensterfalz eingesetzt werden (siehe Illustrationen in Abbildung 26). Je nach Situation bietet sich die eine oder andere Option eher an. Namentlich ist zu unterscheiden, ob die Umsetzung im Rahmen eines Fensterersatzes erfolgen kann oder ob eine bestehende Gegebenheit anzupassen ist.

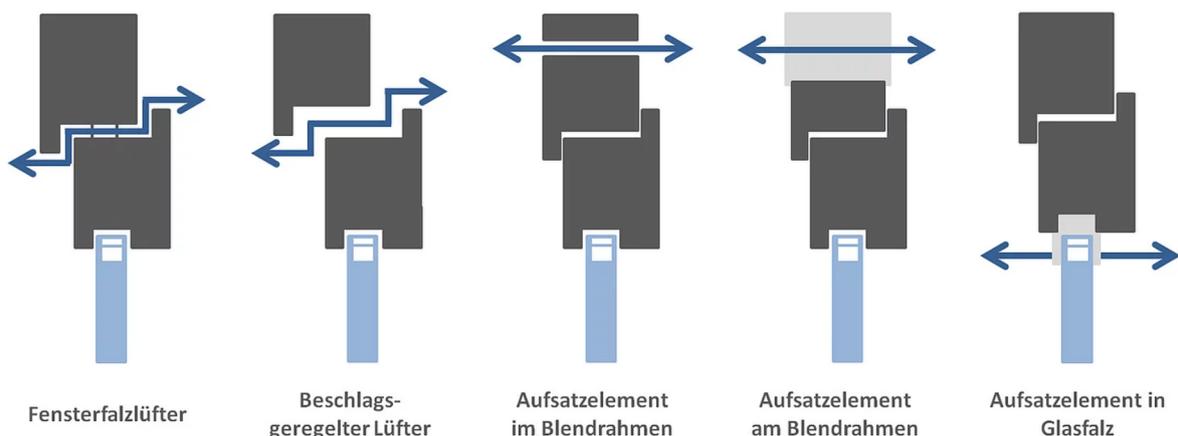


Abbildung 26 Schematische Darstellung der Funktionsweise von Fensterlüftern (Quelle: energie-experten.org (2022))

Auf die automatisierte Fensterlüftung mit einem motorischen Antrieb wird nachfolgend näher eingegangen: Bei bestehenden Wohngebäuden wird der Feuchteschutz im Keller oft über dauernd geöffnete Fenster sichergestellt. Dadurch sinkt die Raumtemperatur im Keller im Winter ab und es entstehen hohe Wärmeverluste über die Kellerdecke sowie häufig auch Komfortprobleme im Erdgeschoss. Mit (weitgehend) geschlossenen Kellerfenstern sinkt die Temperatur im Keller dagegen nur noch auf 16 bis 18°C ab (siehe z.B. Hoffmann et al. (2017)). Zur Sicherstellung des Feuchteschutzes kann ein Kellerfenster mit einem motorischen Antrieb mit Feuchteregelung (z.B. Windowmaster) ausgerüstet werden. Die Kosten dieser Massnahme liegen inkl. Installation im Bereich von 2'000 bis 2'500 CHF pro Fenster (umgerechnet 4 bis 10 CHF/m² EBF). Diese Massnahme verringert die Wärmeverluste über den Keller und unterstützt dadurch Massnahmen zur Reduktion der Vorlauftemperatur (siehe Kap. 5.3.2). Bei einer MFH-Wohnung bietet sich diese Massnahme ebenfalls an, vornehmlich zur Sicherstellung des Feuchteschutzes im Badezimmer und damit zur Vermeidung von dauerhaft gekippten Fenstern. Bei einem Fenstern pro Wohnung ergibt dies 20 CHF/m², was rund dem Sechstel einer Zu- und Abluftanlage entspricht.

5.4.2 Abluftanlagen mit und ohne Abluft-Wärmepumpe

Eine kostengünstige Alternative zu Zu- und Abluftanlagen sind einfache Abluftanlagen. Die Abluft kann meist über bestehende Abluftschächte über Dach geführt und die Abwärme dort wiederum durch eine Luft/Wasser-Wärmepumpe genutzt werden.

Zentrales Element einer konzeptionellen Weiterentwicklung liegt in einer kostengünstigen, pro Nutzereinheit an den Bedarf angepassten Regelung des Abluftvolumenstroms.

Aktuelle Entwicklungen:

Mit Einführung der MuKE n 2014 entfällt bei Abluftanlagen mit CO₂- oder Feuchteregelung in den meisten Kantonen die Pflicht zur Wärmerückgewinnung aus der Abluft. Bezüglich Komfort (Zugluft, trockene Luft im Winter) und Energieeffizienz ist die Reduktion des Abluftvolumenstroms ein Vorteil. Durch die reduzierte Luftmenge kann eine Abluft-Wärmepumpe jedoch nur noch einen geringen Teil des Wärmebedarfs decken.

Praxisbeispiel:

Bei einem Umbauprojekt von 2015 (Muller, Carisch, & Ménard, 2016) decken die Abluft-Wärmepumpen 30% des Leistungsbedarfs und 50% des gesamten jährlichen Wärmebedarfs der Wohnsiedlung. Die Abluftanlagen laufen im Dauerbetrieb mit einem spezifischen Volumenstrom von rund 0.8 m³/m²h, bezogen auf die Energiebezugsfläche. Mit CO₂-geregelten Abluftventilatoren würde der durchschnittliche spezifische Volumenstrom auf rund 0.3 m³/m²h sinken. Die Abluft-Wärmepumpen könnten dann nur noch rund 15% des Wärmeleistungsbedarfs der Wohnsiedlung decken. Das Spitzenlastsystem, in diesem Fall eine Erdsonden-Wärmepumpe, müsste deutlich grösser dimensioniert werden, was mit substanziellen Mehrkosten verbunden wäre.

Abluftanlagen mit CO₂- oder Feuchteregelung und ohne WRG sind eine verhältnismässig kostengünstige Lösung, um den Feuchteschutz bei Umbauten sicherzustellen (Investitionskosten: ca. 3'00 bis 6'000 CHF/Wohnung bzw. 30 bis 60 CHF/m² EBF). Zentrale Abluft-Wärmepumpen wie im Projekt Dettenbühl (Muller et al., 2016) oder in mehreren Wohnsiedlungen im Kanton Genf (Khoury, Hollmüller, Lachal, Schneider, & Lehmann, 2018) werden daher auch in Zukunft voraussichtlich nur in Ausnahmefällen zum Einsatz kommen.

Der Einsatz von Abluft- und Umluft-Wärmepumpen wird sich daher vorwiegend auf Wärmepumpen-Boiler beschränken, speziell bei bestehenden Reiheneinfamilienhäusern mit dezentraler Warmwassererzeugung und zentraler Heizungsanlage (Investitionskosten: ca. 5'000 bis 7'000 CHF pro Wärmepumpen-Boiler). Wärmepumpen-Boiler ermöglichen die Trennung von Raumwärme- und Warmwassererzeugung. Bei zentraler Wärmeerzeugung kann dadurch die Vorlauftemperatur im Wärmeverteilnetz oft ganzjährig substantiell abgesenkt und die Effizienz der zentralen Wärmeerzeugung stark verbessert werden (siehe Kap. 5.3).

Als Alternative zu einer zentralen Abluftanlage kommen bei kleineren Objekten und in schlecht erschliessbaren Räumen auch dezentrale Fassadenlüfter (Pendellüfter, Einzelraumgeräte) in Frage.

5.5 Wärmerückgewinnung Warmwasser

Der Energiebedarf für die Aufbereitung des Warmwassers nimmt mit zunehmender Gebäudeerneuerung anteilmässig an Bedeutung zu (z.B. 46% gemäss MuKE n 2008, 58% gemäss Minergie 2009). Der Wärmebedarf für Warmwasser inkl. Speicher- und Zirkulationsverluste beträgt pro Person in Wohngebäuden im Median 1000 kWh pro Jahr (exkl. Speicher- und Zirkulationsverluste ca. 750 kWh basierend auf dem durchschnittlichen Warmwasserverbrauch in MFH gemäss SIA 385/2: 35 l pro Person pro Tag, 60°C, 365 Tage pro Jahr).

Bei einer spezifischen EBF von 58 m² pro Person (bezugnehmend auf 46.3 m² Wohnfläche im Durchschnitt der Schweiz¹²) ergibt dies 17 kWh/m². Zum Vergleich: SIA 380/1:2016 geht bei MFH von 21 kWh/m², bei EFH von 14 kWh/m² aus (Nutzenergie Q_w). Feldmessungen in städtischen Wohnsiedlungen zeigen, dass der Wärmeverbrauch für Warmwasser in Wohngebäuden im Bereich von 12 bis 15 kWh/m² liegt (Ausnahme: Sozialer Wohnungsbau mit hoher Belegungsdichte). 25% bis 50% des Wärmeverbrauchs für Warmwasser wird durch Speicher-, Zirkulations- und Zapfverluste verursacht. D.h. nur rund 6 bis 12 kWh/m² erreichen tatsächlich die Zapfstellen, davon 50% bis 80% die Duschen.

Der Energieverbrauch im Bereich Warmwasser kann u.a. durch folgende zwei Massnahmen reduziert werden:

- Reduktion des Bedarfs (Ebene Nutzenergie)
- Effizientere Wärmeerzeugung (Wärmeerzeugung)
- Effizientere Warmwasserverteilung
- Wärmerückgewinnung

Sowohl aus Sicht der Wärmeerzeugung als auch aus Sicht der Warmwasserverteilung wäre eine Reduktion des Temperaturniveaus von Vorteil. Eine solche ist nicht zuletzt beim Einsatz von Wärmepumpen von Bedeutung, weil damit die Jahresarbeitszahl aus thermodynamischen Gründen erhöht werden kann. Auf Temperaturniveau und Bedarf kann u.a. mit den folgenden beiden Möglichkeiten reagiert werden:

¹² <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bauwohnungswesen/wohnungen/wohnverhaeltnisse/flaechenverbrauch.html#:~:text=In%20Haushalten%20mit%20mehr%20als,es%2031m2%20pro%20Person.>

- Mittels Duschrinne und eingebauter Wärmerückgewinnung kann der warmwasserbezogene Energiebedarf um 15% bis 45% reduziert werden (beim Duschwasser können bei den besten Lösungen 50% WRG-Nutzungsgrad erreicht werden). Damit können pro Wohnung (2-Personenhaushalt) 300 bis 900 kWh pro Jahr bzw. 3 bis 8 kWh/m² eingespart werden. Die Mehrkosten gegenüber einem Abfluss oder einer herkömmlichen Duschrinne betragen rund CHF 2300 bis 3000 (inkl. Montage) bzw. 23 bis 30 CHF/m² EBF, dies bei der Voraussetzung, dass die sanitären Anlagen ohnehin erneuert werden. Je nach Warmwasser-Wärmeerzeugung (Elektroboiler, fossile Heizung, zentrale WP) können sich damit die Jahreskosten leicht erhöhen oder sie lassen sich leicht senken.
- Mittels sogenannter Frischwasserstation, bei der das Warmwasser direkt bei Bedarf produziert wird und nicht in einem Speicher bereitgehalten wird. Dadurch kann das Temperaturniveau gesenkt werden. Die Vorlauftemperatur kann typischerweise um 10°C bis 15°C gesenkt werden (mit Verweis auf die Legionellen-Thematik muss die VL-Temperatur ggf. einmal pro Woche erhöht werden), wodurch eine Erhöhung der JAZ ermöglicht wird. Je nach Konstellation kann damit auch das Risiko vermieden werden, dass Elektrostäbe zum Einsatz kommen oder dass die VL-Temperatur aufgrund von fehlerhaften Einregelungen auch bei der Raumwärme permanent zu hoch eingestellt ist. Diesen Vorteilen steht der Nachteil von höheren Anschaffungs- und Betriebskosten (Service-Abo) gegenüber. Vor- und Nachteile sind im Einzelfall zu prüfen.

6 Bewertung aus Eigentümersicht und gemäss SIA-Effizienzpfad

Im vorliegenden Kapitel werden kostengünstige Massnahmenkombinationen ermittelt und bzgl. Jahreskosten, direkten CO₂-Emissionen gemäss CO₂-Gesetz sowie Treibhausgasemissionen gemäss SIA-Effizienzpfad bewertet. Obwohl im CO₂-Gesetz ein Absenkpfad vorgesehen ist, der mit wesentlich höheren Werten startet (20 kg mit Absenkung von 5 kg alle 5 Jahre), sollen die Massnahmenkombinationen am Ende so festgelegt werden, dass sie das 6 kg-CO₂-Ziel grundsätzlich einhalten. Für die Massnahmenkombinationen werden sowohl bereits breit angewendete Massnahmen als auch die im Kapitel 5 neu entwickelten mit einbezogen. Das Kapitel besteht aus folgenden Teilschritten:

- Objektakquise: Erhebung von Objektdaten mit Bezug auf die Gebäudetypen in Kap. 3.
- Festlegung der Massnahmenkombinationen und deren Berechnung
- Exemplarische Darstellung der Fallstudien
- Übersichtliche Darstellung der Ergebnisse aus den Fallstudien sowie Fazit

6.1 Objektakquise

Die Objektakquise wurde hauptsächlich vom studio durable übernommen, welche in Zusammenarbeit mit TEP und Lemon Consult kongruente Objektdaten zu fast allen definierten Gebäudetypen erheben konnten. In Tabelle 22 ist ein Überblick zu den Gebäuden dargestellt.

Bei der Datenerhebung stellte es sich schwierig heraus, gemessene oder von Energieabrechnungen abgeleitete Heizenergiekennzahlen als Ausgangsdaten zu erhalten.

Falls keine solchen empirischen Daten verfügbar gemacht werden konnten, wurde der Verbrauch berechnet, wobei man den „Energy Performance Gap“ (EPG) mit einbezogen hat. Dies erfolgt meistens durch die Anpassung von U-Werten und des sog. b-Faktors sowie der Innenraumtemperaturen (vgl. Kap. 2.3.1).

Tabelle 22: Gebäudetypologie der untersuchten Objekte in den Fallstudien (mit den Werten in der Spalte Nr. werden diese nachfolgend identifiziert)

Gebäudetyp, Grösse, Bauweise	Bau- periode	Energieeffizienz Nutzenergie	Nr.	Heizwärme- bedarf [kWh/m²]	Quelle
MFH, klein, 5 Geschosse, freistehend	Vor 1919	Mittel, Fenster und Dach saniert	10	84	Haus- besitzer
MFH, Siedlung, 5 Geschosse, Zwei- und Dreispänner	1919-1945	Schlecht, nur Fenster saniert (ca. 2000)	3	118	Stadt Zürich
MFH, mittelgross, 3 Geschosse, freistehend	1946-1960	Mittel, Teilsanierung (z.B. Fenster und Dachboden 1990er Jahre)	2	133	GBL
MFH, gross, 3 Geschosse, einseitig angebaut	1946-1960	Mittel, Fassade, Fenster mit tiefem, Dach mit hohem Standard saniert.	4	106	PENSIMO
MFH, sehr gross, 4 Geschosse, freistehend	1946-1960	Schlecht, nur Fenster saniert (ca. 1990)	5	125	PENSIMO
MFH, klein (5 Wohnungen), 2 Geschosse, freistehend	1971-1980	Mittel, Gesamtsanierung ohne Fassade um 2000	1	113	Haus- besitzer
MFH, mittelgross, 3 Geschosse, zweiseitig angebaut	1981-1990	mittel, weitgehend nicht saniert	6	94	EIGEN- GRUND
EFH, klein, 2 Geschosse, freistehend	1919-1945	Schlecht, weitgehend unsaniert	8	153	Haus- besitzer
EFH, gross, 2 Geschosse, freistehend	1981-1990	Mittel, nicht saniert	9	27	Haus- besitzer
Bürogebäude, mittelgross, 9 Geschosse, freistehend	1919-1945	Mittel, Flachdach saniert	7	106	Stadt Zürich
Schulhaus, gross, 5 Geschosse, freistehend	1971-1980	Schlecht, weitgehend unsaniert	11	97	Stadt Zürich

6.2 Massnahmenkombinationen

Für die Fallstudie werden zwei Referenzfälle mit verschiedenen Massnahmenkombinationen (sogenannte Strategien) verglichen (siehe Tabelle 23). Auf Basis des Ist-Zustands der Gebäude ergeben sich die Strategien, welche aus Gebäudehüllenmassnahmen sowie Heizungsersatz bestehen. Basierend auf diesen Annahmen werden im INSPIRE Tool die Jahreskosten (unterteilt in Kapital-, Energie- und Betriebskosten) sowie die Treibhausgasemissionen berechnet und in diesem Bericht dargestellt und diskutiert.

Tabelle 23: Untersuchungs-Set-up: generische Strategien

Strategie	Grobe Beschreibung
Ref 1	Instandsetzung Fassade und Fenster sowie Heizungsersatz ohne Systemwechsel
Ref 2	Fensterersatz (falls notwendig) sowie Massnahmen aus Ref 1
Strategie 1 (S1)	Dämmung der gesamten Gebäudehülle + fossiles Heizsystem
Strategie 2 (S2)	Dämmung der gesamten Gebäudehülle + nicht-LICS für Heizsystem
Strategie 3 (S3)	Dämmung der gesamten Gebäudehülle + LICS für Heizsystem
Strategie 4 (S4)	LICS-spezifische Dämmung der Gebäudehülle + LICS für Heizsystem
Strategie 5 (S5)	keine Dämmung + LICS für Heizsystem

Am Beispiel des Mehrfamilienhaus Nr. 4 wird im nachfolgenden Kap. 6.3 die Bewertung der verschiedenen Strategien und LICS exemplarisch dargestellt. Die übrigen Fallstudien sind im Anhang im Detail aufgeführt sowie im übernächsten Kap. 6.4 in der Übersicht.

6.3 Exemplarische Darstellung der Fallstudien

Am Beispiel des Mehrfamilienhaus Nr. 4 werden exemplarisch die Resultate aus der Fallstudie beschrieben. Das Gebäude wird zuerst bzgl. Ist-Zustand charakterisiert. Dies beinhaltet eine Zustandsbeschreibung der bereits durchgeführten Massnahmen sowie empfohlene Massnahmen für die Auswertung der Strategien. Im Anschluss erfolgt eine genauere Beschreibung der zu rechnenden Strategien und der Massnahmendefinition. Zur Berechnung und Bewertung der Massnahmen wird das INSPIRE-Tool (aus dem Projekt „Integrated Strategies and Policy Instruments for Retrofitting Buildings to Reduce Primary Energy Use and GHG Emissions“) mit den aus Kap. 4 aktualisierten Kostenkennwerten benützt. Die wichtigsten Resultate aus dem INSPIRE Tool werden abschliessend in diesem Kapitel dargestellt.

6.3.1 Beschreibung Gebäude Ist-Zustand

Die MFH Im Geissacker 51-53 in Oberwinterthur sind Teil eines Ensembles aus 15 gleich gebauten, aber unterschiedlich sanierten Gebäuden. Sie gehören heute zum Portfolio einer Pensionskasse. Die beiden Gebäude beinhalten 12 Wohnungen und wurden 1958 erbaut. Die

Typologie ist vergleichbar mit den Gebäuden Holzwiesweg. Die einfachen, hochgradig mineralischen Baukörper mit Kammergrundrissen und vergleichsweise kleinen Zimmern sind gedeckt durch ein Steildach als Sparrendach mit geringem Dachüberstand. Die Aussenwände sind ungedämmt und mineralisch verputzt. Die Sonnenschutzsysteme sind als Schlagläden mit Hollamellen ausgebildet.

Hervorzuheben sind die Dachfenster im Steildach, die die Treppenhäuser im vergleichsweise tiefen Grundriss belichten. Vor den Wohnräumen auf der Südseite der Gebäude befinden sich Balkone, die später vor die Fassade gestellt wurden und etwaige bestehende Balkone ersetzt haben. Jene waren auf auskragenden Deckenplatten basiert, so wie sie am Nachbargebäude Geissacker 52 aktuell noch vorhanden sind.

Die Detaillierung des äusseren Erscheinungsbildes ist weniger filigran als in den früheren 50er Jahren, wodurch die architektonische Qualität im Vergleich zu den Gebäude Holzwiesweg leidet.

Die Aussenwände sind bereits leicht gedämmt. Gemäss vorliegendem GEAK aus 2019 liegt der U-Wert der Aussenwand bei $0.35 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die Kellerdecke hat eine mittlere Wärmedämmung. Die Wände gegenüber den unbeheizten Kellerräumen und Estrich sind ungedämmt. Hier besteht Optimierungspotential. Gemäss ausgewiesenem U-Wert des Daches /Estrichbodens von $1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ist das Dach ungedämmt. Die Fenster sind in den letzten Jahren ersetzt worden.

Die Gebäude sind aufgrund ihres Zustandes erhaltenswürdig und wegen ihrer einfachen Struktur auch gut energetisch sanierbar. Im Rahmen von LICS-Lösungen bietet sich aber an, nur das Dach zu dämmen, da dieses nicht bzw. deutlich zu schwach gedämmt sind. Da das Steildach zu flach für einen Ausbau des Estrichs ist, empfiehlt sich die Dämmung des Estrichbodens anstelle des Steildaches. Dieser wird mit einer Dämmung gemäss Energiegesetz ($U = 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$) aus Steinwolle, 12 cm, versehen, die Dämmung wird mit einer begehbaren Holzbeplankung gedeckt (S1-S4).

Die Gasfeuerung besteht seit 1998 und wird durch Solarenergie unterstützt. Das Gebiet liegt nicht im Fernwärmegebiet Winterthur. Das Mehrfamilienhaus sowie deren Umgebung sind in Abbildung 27 dargestellt.

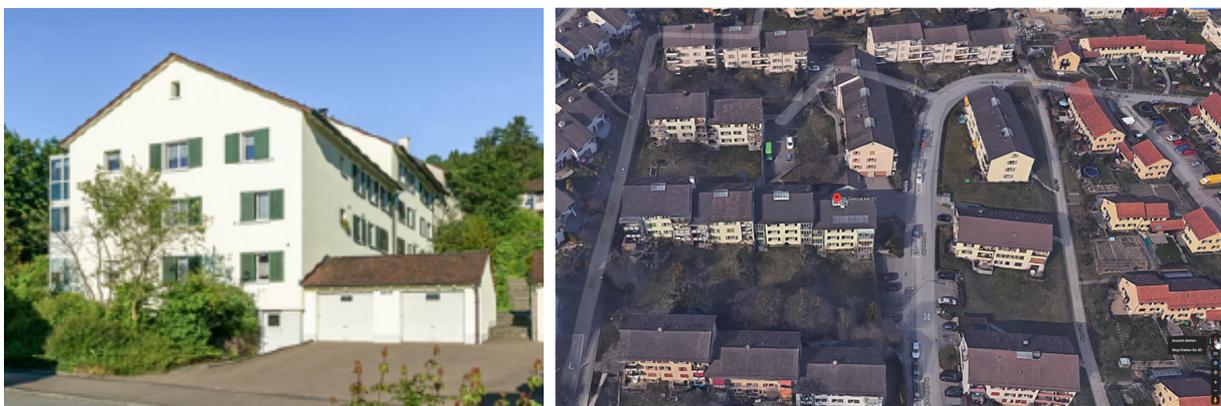


Abbildung 27: MFH mit Baujahr 1958.

Der momentane Ist-Zustand des Mehrfamilienhauses Nr. 4 wird in Tabelle 25 wiedergegeben.

Tabelle 24: Beschreibung Gebäude Nr. 4 Ist-Zustand

Attribut	Wert / Beschreibung
Gebäudekategorie	MFH
EBF (m ²)	965
Grundstücksfläche (m ²)	360
Anzahl Wohnungen	12
Bisherige Massnahmen (inkl. Jahr)	Aussenwand minimal gedämmt, Fenster sind ersetzt, Heizungsersatz 1998
Heizsystem (inkl. Jahr)	Erdgas kombiniert mit Solarthermie (25% WW)
Installierte Wärmeleistung (kW)	47
Brennstoffverbrauch (kWh/m ²)	144
Heizwärmeverbrauch (kWh/m ²)	106
Heizleistungsbedarf (kW) (SIA 384/1 und 384/2)	48

6.3.2 Beschreibung Strategien

Für die Berechnung der Kosten und Emissionen werden im INSPIRE Tool jeweils fünf Strategien (Massnahmenpakete) definiert und diese mit zwei Referenzfällen verglichen (siehe Tabelle 25). Die Gebäudehüllenmassnahmen erfolgen gemäss dem Beschrieb in Kap. 6.3.1.

Tabelle 25: Strategien inkl. Wahl des Heizsystems und der Massnahmen, welche für die Berechnung mit dem INSPIRE Tool berücksichtigt wurden.

Strategie und Beschrieb	Heizsystem
Ref 1: Instandsetzung Fassade und Fenster sowie Heizungsersatz ohne Systemwechsel	Gas
Ref 2: Fensterersatz sowie Massnahmen aus Ref 1	Gas
S1: Dämmung des nicht erneuerten Teils der Gebäudehülle + fossil	Gas
S2: Dämmung des nicht erneuerten Teils der Gebäudehülle + nicht-LICS	S/W-WP
S3: Dämmung des nicht erneuerten Teils der Gebäudehülle + LICS	Luft-WP + Gas
S4: LICS-spezifische Dämmung des nicht erneuerten Teils der Gebäudehülle + LICS	Luft-WP + Gas
S5: keine weitere Dämmung + LICS	Luft-WP + Gas

6.3.3 Ergebnisse mit INSPIRE Tool

Die Massnahmenkombinationen wurden in einem nächsten Schritt durch die Verwendung des INSPIRE Tools mit aktualisierten Kostenkennwerten auf ihre ökonomischen und ökologischen Auswirkungen untersucht.

Einleitend ist anzumerken, dass im vorliegenden Fall des MFH Nr. 4 die Dämmung der gesamten Gebäudehülle von S₁ bis S₄ gleichbedeutend mit der LICS-spezifischen Dämmung (S₄).

Die mit dem INSPIRE Tool berechneten Jahreskosten (Kapital-, Betrieb- und Unterhalt- sowie Energiekosten) und Treibhausgasemissionen (nach CO₂-Gesetz und nach KBOB) unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Strategien (Massnahmenpakete) in ihrer Höhe, vor allem aber in ihrer Struktur (Verhältnis Kapital und Energiekosten, siehe Abbildung 28). Gemäss den Auswertungen mit dem INSPIRE Tool ergeben sich für die Strategien 1-5 leicht höhere Jahreskosten (Summe aus Kapital-, Betrieb- und Unterhalts- sowie Energiekosten) als im Referenzfall 1. Verglichen zum Referenzfall 2 fallen die Kosten, durch Einsparungen bei den Energiekosten, bei der Strategie 1 sogar leicht tiefer aus, während sie bei den anderen Strategien wiederum leicht höher liegen. Mit einem Wechsel zu einer S/W-WP (S₂) oder einem bivalent-erneuerbaren Heizsystem (S₃-S₅) kann der CO₂-Grenzwert von 6 kg/m² unterboten werden. Unter Berücksichtigung der THG-Emissionen nach KBOB kann der Richtwert SIA 2040 nur mit der Strategie 2 oder den Strategien 3 und 4 (im vorliegenden Fall identisch) erreicht werden, dies bei reduzierten Kosten im Vergleich zur Strategie 5.

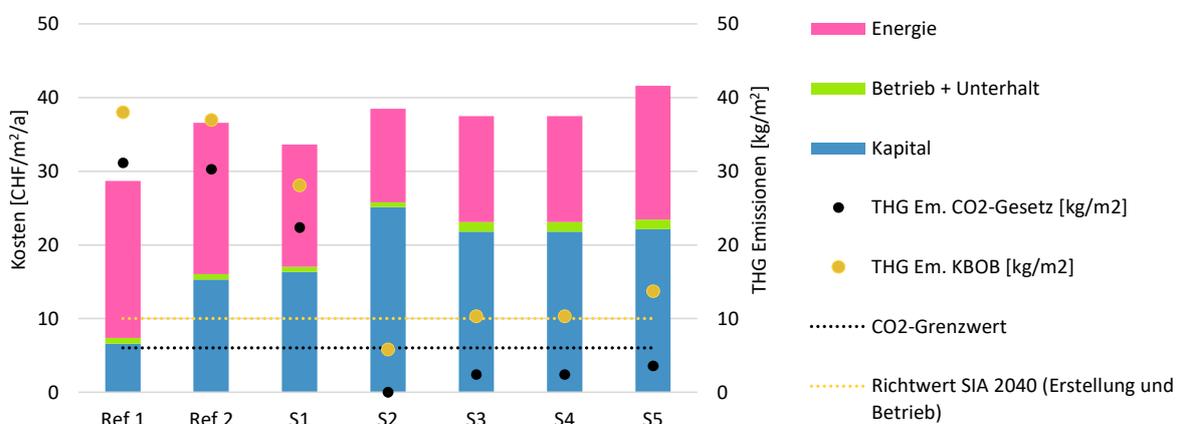


Abbildung 28: Jahreskosten (Kapital, Betrieb und Unterhalt, Energie) pro m² EBF und Jahr sowie Treibhausgasemissionen für die beiden Referenzfälle und die fünf vergleichenden Strategien. Berechnet mit INSPIRE Tool.

Die Investitionskosten (absolut und flächenspezifisch pro Jahr) sowie die flächenspezifische Primärenergie (erneuerbarer Anteil sowie Total) unterscheiden sich für die verschiedenen Strategien (Massnahmenpakete) gemäss Tabelle 26. Die höchsten Investitionskosten weist die Strategie S₂, also eine «klassische» Gebäudeerneuerung mit Hüllendämmung (hier: nur Fensterersatz) und erneuerbarem Heizsystem (hier: S/W-WP). Verglichen zu den rund 450 CHF/m² lassen sich die Investitionen mit den Strategien S₃ bis S₄ um rund 15% reduzieren. Dafür müssen z.T. leicht höhere Emissionen in Kauf genommen werden: +2 bis +4 kg CO₂/m²

bei den direkten CO₂-Emissionen. Auch bei den THG-Emissionen gemäss KBOB resultieren gegenüber S₂ leicht höhere Werte (aufgrund des Gasanteils bei S₃-S₅ sowie wegen der geringeren Dämmung bei S₅). Dennoch können mit den LICS-Strategien S₃-S₄ der CO₂-Grenzwert sowie der Richtwert nach SIA 2040 eingehalten werden. Mit Strategie 5 kann der Richtwert SIA 2040 nicht eingehalten werden (bei höheren Kosten).

Tabelle 26: Investitionskosten, Treibhausgasemissionen und Primärenergie (PE) für Gebäude Nr. 4, Berechnungen aus INSPIRE Tool.

	Ref 1	Ref 2	S1	S2	S3	S4	S5
Investitionskosten [Tsd. CHF]	100	265	293	436	370	370	361
Investitionskosten [CHF/m ²]	103	275	304	452	383	383	374
THG Emissionen CO ₂ -Gesetz [kg/m ²]	31	30	22	0	2	2	4
THG Emissionen KBOB [kg/m ²]	38	37	28	6	10	10	14
PE erneuerbar [MJ/m ²]	816	796	642	326	585	585	746
PE total [MJ/m ²]	879	859	705	624	878	878	1'121

Quelle: Berechnungen mit dem INSPIRE-Tool basierend auf Objektdaten und Annahmen zu den Strategien

6.4 Ergebnisse zu den Fallstudien in der Übersicht

Die in Kapitel 6.3 beispielhaft dargestellte Analyse und deren Ergebnisse sind für sämtliche Objekte aus den Fallstudien in einem separaten Anhangsbericht im Detail dokumentiert (Martin Jakob, Müller, Lamster, & Ménard, 2022). In diesem Kapitel werden die Umsetzung der Strategien und die daraus resultierenden Ergebnisse der übrigen Fallstudien in der Übersicht dargestellt.

6.4.1 Anwendung der Strategien S1 bis S5 auf die 11 Fallstudien

Je nach Objekt und Strategie eignen sich verschiedene Heizsysteme als LICS-Lösung und/oder als erneuerbares Heizsystem. Eine Übersicht der berücksichtigten Heizsysteme pro Objekt und Strategie ist in Tabelle 27 dargestellt. Abgesehen von den Objekten sechs und sieben wird in den Referenzstrategien und in Strategie S₁ aus methodisch-didaktischen Gründen bei allen Fallstudien eine fossile Heizung verwendet. In der Strategie S₁ wird die Gebäudehülle je nach Ausgangslage ganz oder teilweise wärmegeklämt, in der Strategie S₂ kommt ein erneuerbares Heizsystem, in den Strategie S₃-S₅ eine LICS-Lösung, in der Regel ein bivalentes System mit fossilem Energieträger als Spitzenlast, zur Anwendung.

Tabelle 27: Berücksichtigte Heizsysteme der Gebäude für die verschiedenen Strategien.

	Ref 1	Ref 2	S1	S2	S3	S4	S5
1	Gas	Gas	Gas	Pellets	L/W-WP + Gas	L/W-WP + Gas	L/W-WP + Gas
2	Gas	Gas	Gas	S/W-WP	L/W-WP + Gas	L/W-WP + Gas	L/W-WP + Gas
3	Gas	Gas	Gas	Fern- wärme	L/W-WP + Gas	L/W-WP + Gas	L/W-WP + Gas
4	Gas	Gas	Gas	S/W-WP	L/W-WP + Gas	L/W-WP + Gas	L/W-WP + Gas
5	Öl	Öl	Öl	Pellets	L/W-WP + Öl	L/W-WP + Öl	L/W-WP + Öl
6	Gas + Öl	Gas + Öl	Gas + Öl	S/W-WP	L/W-WP + Gas	L/W-WP + Gas	L/W-WP + Gas
7	Gas + Pellets	Gas + Pellets	Gas + Pellets	W/W-WP + Pellets	L/W-WP + Gas	L/W-WP + Gas	L/W-WP + Gas
8	Gas	Gas	Gas	S/W-WP	L/W-WP	L/W-WP	L/W-WP
9	Gas	Gas	Gas	S/W-WP	L/W-WP	L/W-WP	L/W-WP
10	Gas	Gas	Gas	S/W-WP	L/W-WP + Gas	L/W-WP + Gas	L/W-WP + Gas
11	Gas	Gas	Gas	S/W-WP + PVT	L/W-WP + Gas	L/W-WP + Gas	L/W-WP + Gas

Quelle: TEP Energy, LTL und Studio Durable (dieses Projekt)

Die angenommenen U-Werte und Kostenkennwerte (CHF/m² Bauteilfläche) für die Berechnungen mit dem INSPIRE Tool sind in Tabelle 28 dargestellt. Dabei werden die Werte für Fassade, Fenster, Dach, Kellerdecke, Estrichboden (falls vorhanden) und jeweils pro Objekt und Strategie aufgeführt.

Tabelle z8: Angenommene U-Werte in W/m²/K (oben) und Kostenkennwerte in CHF/m² (unten) für die Berechnungen im INSPIRE Tool.
Differenzierung nach Objekt, Bauteil und Strategie

Gebäude	Fassade							Fenster							Dach							Kellerdecke							Estrichboden						
	Ref1	Ref2	S1	S2	S3	S4	S5	Ref1	Ref2	S1	S2	S3	S4	S5	Ref 1	Ref 2	S1	S2	S3	S4	S5	Ref1	Ref2	S1	S2	S3	S4	S5	Ref1	Ref2	S1	S2	S3	S4	S5
1	0.70	0.70	0.40	0.40	0.40	0.70	0.70	1.73	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.50	0.28	0.28	0.28	0.50	0.50	1.00	1.00	0.28	0.28	0.28	1.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-
2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.80	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	0.70	0.70	0.25	0.25	0.25	0.25	0.70	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
3	1.30	1.30	0.40	0.40	0.40	0.85	1.30	1.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.40	0.40	0.34	0.34	0.34	0.40	0.40	0.50	0.50	0.28	0.28	0.28	0.28	0.50	0.50	0.50	0.28	0.28	0.28	0.28	0.50
4	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	1.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	1.50	1.50	0.28	0.28	0.28	0.28	1.50	0.50
5	1.40	1.40	0.28	0.28	0.28	1.40	1.40	2.10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.46	0.46	0.28	0.28	0.28	0.28	0.46	0.50	0.50	0.28	0.28	0.28	0.28	0.50
6	0.85	0.85	0.20	0.20	0.20	0.85	0.85	1.40	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.45	0.45	0.28	0.28	0.28	0.28	0.45	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
7	1.10	1.10	0.24	0.24	0.24	1.10	1.10	2.20	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.00	1.00	0.61	0.61	0.61	0.80	1.00	1.50	1.50	0.28	0.28	0.28	0.28	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	1.00	1.00	0.20	0.20	0.20	1.00	1.00	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	1.00	1.00	0.84	0.84	0.84	0.84	1.00	1.00	1.00	0.28	0.28	0.28	0.28	1.00
9	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	1.05	1.05	0.88	0.88	0.88	0.88	1.05	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
10	0.90	0.90	0.20	0.20	0.20	0.90	0.90	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
11	1.10	1.10	0.40	0.40	0.40	0.40	1.10	2.30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.60	0.60	0.25	0.25	0.25	0.25	0.60	1.10	1.10	0.20	0.20	0.20	1.10	1.10	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

Gebäude	Fassade							Fenster							Dach							Kellerdecke							Estrichboden							
	Ref1	Ref2	S1	S2	S3	S4	S5	Ref1	Ref2	S1	S2	S3	S4	S5	Ref1	Ref2	S1	S2	S3	S4	S5	Ref1	Ref2	S1	S2	S3	S4	S5	Ref1	Ref2	S1	S2	S3	S4	S5	
1	80	80	331	331	331	80	80	40	998	998	998	998	998	998	0	0	400	400	400	0	0	0	0	104	104	104	0	0	-	-	-	-	-	-	-	
2	40	40	40	40	40	40	40	20	827	827	827	827	827	827	0	0	0	0	0	0	0	0	0	104	104	104	104	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	40	40	202	202	202	202	40	20	827	827	827	827	827	827	0	0	180	180	180	0	0	0	0	104	104	104	104	0	0	0	0	89	89	89	89	0
4	40	40	40	40	40	40	40	20	827	827	827	827	827	827	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	92	92	92	92	0
5	40	40	205	205	205	40	40	20	1187	1187	1187	1187	1187	1187	0	0	0	0	0	0	0	0	0	104	104	104	104	0	0	0	0	89	89	89	89	0
6	40	40	196	196	196	40	40	40	827	827	827	827	827	827	0	0	0	0	0	0	0	0	0	104	104	104	104	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	46	46	243	243	243	46	46	40	827	827	827	827	827	827	0	0	193	193	193	193	0	0	0	136	136	136	136	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	38	38	199	199	199	38	38	20	20	20	20	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	104	104	104	104	0	0	0	0	83	83	83	83	0
9	38	38	38	38	38	38	38	40	40	300	300	300	300	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	40	40	196	196	196	40	40	20	20	20	20	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	46	46	235	235	235	235	46	20	1187	1187	1187	1187	1187	1187	0	0	183	183	183	183	0	0	0	112	112	112	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

6.4.2 Ergebnisse aus den Fallstudien

Zu Vergleichszwecken sind die wichtigsten Indikatoren (bzgl. Kosten und Energie) für die verschiedenen Objekte und Strategien in Tabelle 29 und Tabelle 30 als sogenannte Heatmaps grafisch dargestellt.

1. **Investitionskosten:** Die flächenspezifischen Investitionskosten fallen für die verschiedenen Strategien sehr unterschiedlich aus. Das Max/Min-Verhältnis von höchsten und tiefsten Investitionskosten variiert zwischen 2.3 (Gebäude 9) und 8 (Gebäude 11). Bei ersterem ist der energetische Standard des Gebäudes schon weitaus fortgeschrittener. Demgegenüber ist für letzteres Gebäude bei der energetischen Sanierung der Gebäudehülle mit hohen Investitionskosten zu rechnen (welche jedoch zumindest teilweise durch die geringeren Energiekosten kompensiert werden). Die Zahlen zeigen, dass für die unterschiedlichen bivalenten Systeme sowie die Gebäudehüllenerneuerungen erhebliche Investitionen notwendig sind. Die erhöhten Investitionen kommen aber im Betrieb den laufenden Kosten zugute (siehe nächster Abschnitt Jahreskosten). Vor allem mit den LICS-Strategien 4 und 5 können die Investitionskosten gegenüber den Strategien 1-3 zum Teil deutlich gesenkt werden.
2. **Jahreskosten:** Die Jahreskosten (Kapital-, Betriebs- und Unterhalts- sowie Energiekosten) variieren je nach Objekt und Strategie zwischen 16 und 54 CHF/m². Die unterschiedlichen Kosten anhand der verschiedenen Strategien variieren jedoch unterschiedlich stark zwischen den Objekten. Bei Objekt 1 fallen die Jahreskosten für die Strategie 2 (höchste Jahreskosten) rund 130% höher aus als beim Referenzfall 1 (tiefste Kosten). Demgegenüber weist Objekt 8 nur 16% höhere Kosten bei der teuersten Strategie im Vergleich zur günstigsten Strategie auf. Für die Objekte 2 bis 5 liegt die Strategie 2 (Gebäudehüllendämmung mit Nicht-LICS Lösung) nur knapp über der günstigsten Strategie, dies bei teilweise geringeren Emissionen.
3. **Endenergie:** Die Endenergie (ohne Umweltwärme) kann im besten Fall und je nach Objekt um 68 – 88% verglichen zu den Referenzfällen gesenkt werden. Dies hauptsächlich durch den Einsatz von Wärmepumpen.
4. **Emissionen nach CO₂-Gesetz:** Die direkten Emissionen nach CO₂-Gesetz können abgesehen von der fossilen Lösung (Strategie 1) mit allen Strategien 2-5 deutlich gesenkt werden. Der CO₂-Grenzwert von 6 kg/m² kann unter Berücksichtigung der direkten Emissionen nach CO₂-Gesetz mit den vorliegenden Strategien 2-5 für alle Objekte eingehalten werden.
5. **Emissionen nach KBOB:** Die totalen Emissionen können je nach Objekt und Strategie auf 5 bis 16 kg CO₂/m² gesenkt werden. Der Richtwert für Erstellung und Betrieb bei Umbauten (Wohnen und Schule) beläuft sich gemäss SIA-Effizienzpfad Energie 2040 auf 10 kg CO₂/m². Dieser Richtwert kann mit den Strategien 2 und 3 für fast alle Gebäude eingehalten werden, mit den Strategien 4 und 5 teilweise jedoch nicht.

Tabelle 29: Spezifische Investitionskosten und Jahreskosten (Summe aus Kapital-, Betrieb- und Unterhalt sowie Energiekosten) für sämtliche untersuchten Objekte und Strategien. Die Strategien sind ergeben sich durch die definierten Gebäudehüllenmassnahmen in Tabelle 23 sowie den Heizsystemen aus Tabelle 27.

Gebäude	Ref 1	Ref 2	Strategie 1	Strategie 2	Strategie 3	Strategie 4	Strategie 5	
Investitionskosten [CHF/m ²]	1	115	269	711	791	799	376	376
	2	106	218	238	330	287	287	305
	3	89	163	310	334	371	298	247
	4	103	275	304	452	383	383	374
	5	103	272	415	440	481	424	378
	6	95	311	429	583	501	429	354
	7	65	279	403	462	450	371	360
	8	189	189	412	600	473	329	289
	9	112	112	118	256	165	165	162
	10	85	85	183	319	238	163	163
	11	40	138	217	317	259	251	198

Gebäude	Ref 1	Ref 2	Strategie 1	Strategie 2	Strategie 3	Strategie 4	Strategie 5	
Jahresskosten [CHF/m ² /a]	1	23	31	47	54	52	37	37
	2	29	34	33	34	34	34	37
	3	28	31	32	32	34	33	35
	4	29	37	34	38	37	37	42
	5	33	39	36	38	37	43	42
	6	27	40	39	44	41	41	37
	7	23	31	31	32	32	33	34
	8	41	41	40	47	42	43	45
	9	24	24	22	31	22	22	23
	10	25	25	25	31	28	28	28
	11	16	19	20	25	22	22	22

Tabelle 30: Endenergie und CO₂-Emissionen (nach CO₂-Gesetz und nach KBOB). Die Strategien ergeben sich durch die definierten Gebäudehüllenmassnahmen in Tabelle 23 sowie den Heizsystemen aus Tabelle 27

Gebäude	Ref 1	Ref 2	Strategie 1	Strategie 2	Strategie 3	Strategie 4	Strategie 5	
Endenergie [kWh/m ²]	1	134	125	94	114	41	58	58
	2	153	142	131	40	59	59	64
	3	163	154	100	111	41	54	69
	4	152	144	104	31	45	45	65
	5	176	161	87	110	34	69	72
	6	135	128	88	22	33	51	52
	7	137	110	58	17	22	43	47
	8	198	198	93	26	31	65	79
	9	48	48	48	16	14	14	14
	10	120	120	80	25	32	52	52
	11	89	79	55	21	22	27	34

Gebäude	Ref 1	Ref 2	Strategie 1	Strategie 2	Strategie 3	Strategie 4	Strategie 5	
THG Emissionen CO ₂ -Gesetz [kg/m ²]	1	27	25	19	0	2	3	3
	2	31	29	27	0	3	3	4
	3	33	31	20	0	2	3	4
	4	31	30	22	0	2	2	4
	5	47	43	23	0	2	5	5
	6	27	26	18	0	2	3	3
	7	21	17	9	0	1	3	3
	8	40	40	19	0	0	0	0
	9	10	10	10	0	0	0	0
	10	24	24	16	0	2	3	3
	11	18	16	11	0	1	2	2

Gebäude	Ref 1	Ref 2	Strategie 1	Strategie 2	Strategie 3	Strategie 4	Strategie 5	
THG Emissionen KBOB [kg/m ²]	1	33	31	27	5	7	8	8
	2	38	36	33	7	13	13	14
	3	40	38	26	13	10	12	14
	4	38	37	28	6	10	10	14
	5	55	51	31	7	11	16	16
	6	34	32	23	6	8	6	6
	7	26	22	13	5	6	9	9
	8	47	47	26	7	8	12	13
	9	14	14	14	5	5	5	5
	10	31	31	22	7	8	12	12
	11	28	26	21	5	7	8	9

In Abbildung 29 sind die relativen Differenzkosten pro Bezugsfläche und Jahr (Kapital-, Betrieb- und Unterhalt- sowie Energiekosten) sowie die Emissionsreduktion (auf Basis KBOB) für die verschiedenen Strategien und Objekte im Vergleich zum Referenzfall 1 illustriert. Abgesehen von Objekt 1 und 6 betragen die relativen Mehrkosten für die meisten Strategien weniger als 50% (absolut: weniger als 10 CHF/m² pro Jahr, teilweise sogar weniger als 5 CHF/m² pro Jahr, wie aus Tabelle 29 abgeleitet werden kann). Für die Objekte 8 und 9 ermöglichen einige der vorgesehenen Strategien sogar geringere Jahreskosten als im Referenzfall 1. Demgegenüber können die Emissionen durch die verschiedenen Strategien um 20% bis knapp 90% gesenkt werden. Anhand der Strategien 2 bis 5 können die Emissionen, verglichen zum Referenzfall 1, in der Regel um deutlich über 60% gesenkt werden.

Für die Einzelfallbetrachtung des Objektes 5 zeigt sich zum Beispiel, dass anhand der Strategien 2 und 3 (Gebäudehüllendämmung mit LICS und ohne LICS) die relativen Differenzkosten deutlich geringer ausfallen wie für die Strategie 4 und 5 (mit LICS-spezifischer Dämmung

sowie ohne Dämmung). Dies bei gleichzeitig stärkerer Emissionsreduktion. Im Fall des Objektes 1 ist genau das Gegenteil der Fall.

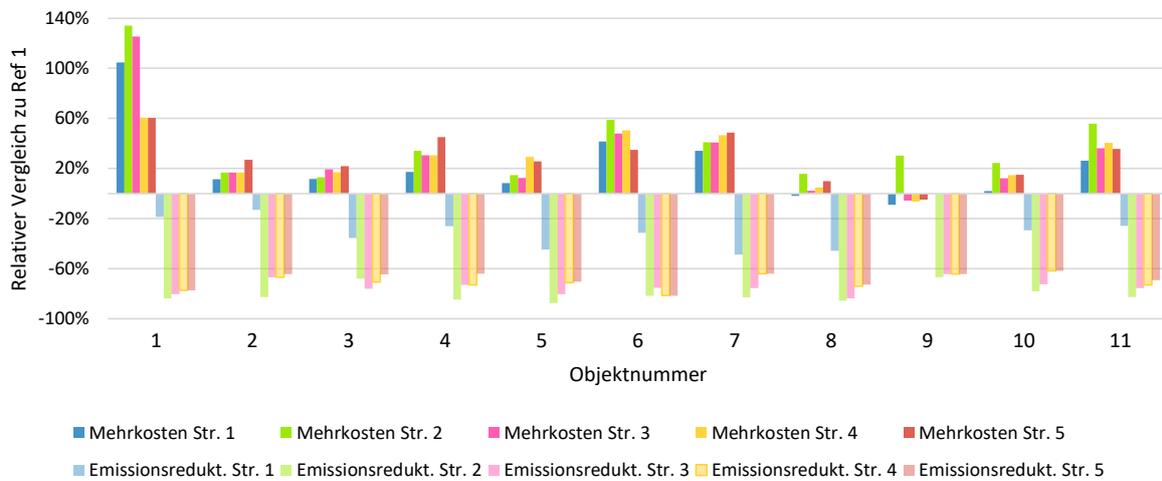


Abbildung 29: Spezifische Differenzkosten (Kapital, Betrieb- und Unterhalt- sowie Energiekosten) und Emissionsreduktionen pro Strategie und Objekt verglichen zum Referenzfall 1.

Zum Vergleich sind in Abbildung 30 die relativen Mehrkosten pro Bezugsfläche und Jahr (Kapital-, Betrieb- und Unterhalt- sowie Energiekosten) sowie die Emissionsreduktion (auf Basis KBOB) für die verschiedenen Strategien und Objekte auch im Vergleich zum Referenzfall 2 illustriert. Verglichen mit Referenzfall 2 können die Mehrkosten auf ein Minimum gesenkt werden oder die Strategien sind sogar günstiger. Demgegenüber fällt die Emissionsreduktion in einem sehr vergleichbaren Rahmen wie in Abbildung 29 aus. Mit den Strategien 2-5 können die Emissionen für fast alle Objekte um mehr als 60% gesenkt werden.

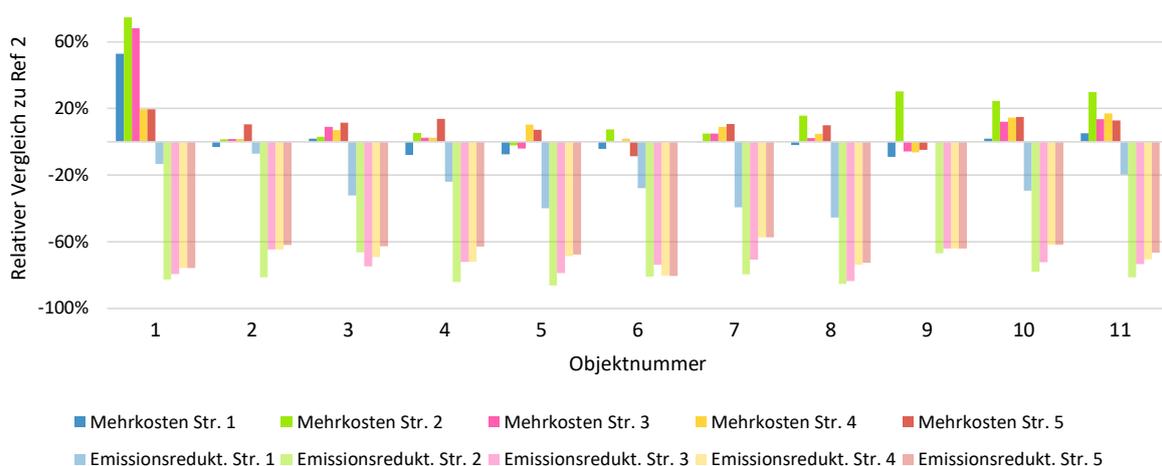


Abbildung 30: Spezifische Differenzkosten (Kapital, Betrieb- und Unterhalt- sowie Energiekosten) und Emissionsreduktionen pro Strategie und Objekt verglichen zum Referenzfall 2.

6.5 Sensitivitätsanalyse

Mit Verweis auf die Unsicherheiten bei den Kostenkennwerten für Fassadenwärmedämmungen werden in diesem Kapitel die Ergebnisse aus den Fallstudien unter der Annahme von höheren Kostenkennwerten abgebildet. Konkret werden die Investitionskosten für Fassadenwärmedämmungen um 100 CHF/m² erhöht. Die resultierenden spezifischen Investitionskosten sowie den spezifischen Jahreskosten sind in Tabelle 31 dargestellt.

In absoluten Werten erhöhen sich die spezifischen Investitionskosten je nach Flächenverhältnis von Fassade zu EBF um 45 CHF/m² bis 100 CHF/m². Die spezifischen Investitionskosten erhöhen sich je nach Strategie und Objekt um 4% bis 36% (bei den Strategien und Objekten, die eine Fassadenwärmedämmung enthalten). Im Mittel liegen die Investitionskosten bei Strategie 1 um 17%, bei Strategie 2 um 13% und bei Strategie 3 um 15% höher, verglichen zum Fall mit günstigeren Kostenkennwerten (siehe Tabelle 29).

Die spezifischen Jahreskosten steigen demgegenüber vergleichsweise weniger stark an, nämlich nur um 2% (Objekt 11, S₂) bis 14% (Objekt 10, S₁) an. Im Mittel liegen die spezifischen Jahreskosten rund 8% höher im Vergleich zum Fall mit günstigeren Kostenkennwerten für Fassadenwärmedämmungen. Der beschränkte Einfluss der höheren Investitionskosten für Fassadenwärmedämmungen zeigt sich auch in den absoluten Werten und beim Vergleich der Strategien. Trotz höheren Investitionskosten liegen die Jahreskosten insbesondere bei den Strategien S₁ und S₃ meist nur minimal höher.

Tabelle 31: Resultierende spezifische Investitions- und Jahreskosten bei erhöhten Kostenkennwerten von Fassadenwärmedämmungen (+100 CHF/m² im Vergleich zu den Annahmen und Ergebnissen in Kapitel 6.4).

Gebäude	Investitionskosten [CHF/m ²]							
	Ref 1	Ref 2	Strategie 1	Strategie 2	Strategie 3	Strategie 4	Strategie 5	
1	115	269	780	860	867	376	376	
2	106	218	238	330	287	287	305	
3	89	163	365	389	427	325	247	
4	103	275	304	452	383	383	374	
5	103	272	481	506	547	424	378	
6	95	311	495	649	567	429	354	
7	65	279	456	516	503	371	360	
8	189	189	513	702	574	329	289	
9	112	112	118	256	165	165	162	
10	85	85	249	385	304	163	163	
11	40	138	230	330	272	251	198	

Gebäude	Jahresskosten [CHF/m ² /a]							
	Ref 1	Ref 2	Strategie 1	Strategie 2	Strategie 3	Strategie 4	Strategie 5	
1	23	31	50	57	55	37	37	
2	29	34	33	34	34	34	37	
3	28	31	34	35	36	34	35	
4	29	37	34	38	37	37	42	
5	33	39	39	41	40	43	42	
6	27	40	42	47	44	41	37	
7	23	31	33	35	35	33	34	
8	41	41	45	52	47	43	45	
9	24	24	22	31	22	22	23	
10	25	25	28	34	31	28	28	
11	16	19	21	25	22	22	22	

Als Fazit kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse bei der Sensitivität mit höheren Fassadenwärmedämm-Investitionskosten noch etwas deutlicher für die Vorteile der LICs-

Lösungen sprechen als der Basisfall mit eher optimistisch tiefen diesbezüglichen Annahmen. Im grossen Ganzen bleiben die Fazits jedoch dieselben.

6.6 Fazit und Erkenntnisse aus den Fallstudien

Anhand der Fallstudien konnte der Ansatz von LICS-Lösungen an konkreten Objekten illustriert werden. Durch die verschiedenen Gebäude konnte ein breites Spektrum an verschiedenen Bauten abgedeckt werden und der Einfluss der LICS-Lösungen bzgl. verschiedener Indikatoren, sowohl bzgl. Kosten (Investitions-, Betrieb- und Unterhalt sowie Energiekosten) als auch bzgl. energetischer Aspekte (Primärenergie, Endenergie, Treibhausgasemissionen), aufgezeigt werden. Folgende Fazits können festgehalten werden:

- Für Strategie S₃ (LICS-Heizsystem mit Hüllenwärmedämmung) fallen sowohl die Investitionskosten als auch die totalen Jahreskosten in der Regel nur leicht höher aus als bei der fossilen Lösung mit Hüllenwärmedämmung (S₁), dies bei deutlich geringeren Emissionen. Bei den Investitionskosten beträgt der Anstieg rund 50 bis 80 CHF/m² (was bis zu 20% entspricht) und bei den Jahreskosten in der Regel 1 bis 2 CHF/m² (d.h. weniger als 10%).
- Die Investitionskosten können bei den hier analysierten Gebäuden für die Strategien mit LICS-Lösung ohne zusätzliche Gebäudehüllendämmung (S₄ und S₅) in einem überschaubaren Rahmen gehalten werden, in der Regel unter 400 CHF/m² (im Vergleich zu ohnehin erforderlichen Instandsetzungen bzw. vergleichbarer Neuwertschaffung (Ref2) liegen die Investitionskosten damit in der Regel rund 70 bis 150 CHF/m² höher).
- Die Strategien S₄ und S₅, weisen teils höhere, teils tiefere Investitionskosten auf als die fossile Lösung (S₁), aber in allen Fällen tiefere als die umfassende Erneuerbaren- und Effizienzstrategie S₂. Im Vergleich zu dieser Strategie S₂ (Gebäudehüllendämmung und im Betrieb 100% erneuerbares Heizsystem) liegen die Emissionen zwar etwas höher (in der Regel 2 bis 4 kg/m²), trotzdem können sie bei den LICS-Lösungen S₃ bis S₅ deutlich reduziert und unter dem Wert von 6 kg CO₂/m² gehalten werden.

Mit den Fallstudien konnte aufgezeigt werden, dass mit LICS-Lösungen, bestehend aus bivalentem Heizsystem die Investitionskosten in den meisten Fällen reduziert werden können, besonders wenn auf das Ergreifen von Wärmedämmmassnahmen verzichtet wird. Die CO₂- und Treibhausgasemissionen liegen war höher als bei einem (im Betrieb) komplett erneuerbaren System, unterschreiten aber doch den Wert von 6 kg/m². Damit stellen sie zwar nicht eine Lösung für eine sofortige vollständige Dekarbonisierung dar, sind jedoch interessant effektive und umsetzbare Massnahme mit überschaubaren Investitionsbedarf. Solche Lösungen können als Initial- und Übergangslösung beispielsweise bei schlecht gedämmten Altbauten zum Einsatz kommen, bei denen eine Wärmedämmung der Gebäudehülle (noch) nicht zur Disposition steht und bei denen eine monovalente erneuerbare Lösung schwierig oder nicht umsetzbar ist (z.B. wegen Lärm- oder Platzproblemen, fehlender Verfügbarkeit, geringer Effizienz etc.). Bei einer Gebäudehüllendämmung zu einem späteren Zeitpunkt kann dann auf den fossilen Spitzenlastteil verzichtet und eine vollständige Dekarbonisierung erreicht werden. Entsprechend ist es wichtig, dass Gebäudetechnikerinnen, Planende und Installateure die Gebäudeeigentümer auf solche Lösungen hinweisen, im Idealfall im Rahmen einer Beratung für eine Langfristgesamtstrategie.

7 Gebäudeparkbetrachtung

Luft/Wasser-WP stellen für Gebäudeeigentümer grundsätzlich eine interessante und relativ investitionskostengünstige Lösung dar, die THG-Emissionen im Vergleich zu den bestehenden fossilen Anlagen deutlich zu reduzieren, zumindest im unteren und mittleren Leistungsbereich. Die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Fallstudien, Praxiserfahrungen der Autoren und weitere Erkenntnisse zeigen jedoch auch Limitationen dieser Lösung auf. Je nach Situation sind Lärmschutzanforderungen, Platzbedürfnisse und/oder Effizienz Nachteile zu nennen, welche zu höheren Kosten führen oder die monovalente Luft/Wasser-WP gar unmöglich machen. Mit bivalenten Luft/Wasser-WP, einem zentralen Element der hier untersuchten investitionskostengünstigen Sanierungskonzepten (Low Invest Cost Strategies, LICS), kann ein Teil der Limitationen ganz oder teilweise überwunden werden.

Es stellt sich also die Frage, wie relevant die genannten Nachteile gesamthaft für den Gebäudepark sind und wie stark die LICS-Lösungen dazu beitragen können, die Emissionen des Gebäudeparks in der Schweiz zu reduzieren. Um den ersten Teil der Frage zu beantworten, wird in einem Geographischen Informationssystem (GIS) eine Parameterstudie durchgeführt, um Potenziale und Restriktionen von Luft/Wasser-WP, die sich aus Distanzanforderungen und räumlichem Platzangebot ergeben, für verschiedene Fälle zu eruieren (Kap. 7.1). Das Ergebnis dient auch als Input für die Gebäudeparkmodellierung, mit der der zweite Teil der Frage beantwortet wird (Kap. 7.2). Mit der Gebäudeparkmodellierung werden zudem weitere Fragestellungen des LICS-Projekts beantwortet (z.B. Effekte der Kostendatenaktualisierung und der Anpassung der Leistungsberechnungsmethodik).

7.1 Parameterstudie zur Bestimmung der Potenziale und Restriktionen von Luft/Wasser-Wärmepumpen

Ausgangspunkt für die Parameterstudie auf Gebäudeparkebene sind die Ergebnisse zur Entwicklung der LICS-Konzepte (Kap. 5) und zu den Fallstudien (Kap. 6) sowie weitere Erkenntnisse:

- Luft/Wasser-WP und bivalente Luft/Wasser-WP sind zentrale Bestandteile von investitionskostengünstigen Sanierungskonzepten (LICS).
- Aufgrund der Lärmthematik und des beschränkten Platzangebots innerhalb und ausserhalb der Gebäude sind Distanz- und Abstandsbetrachtungen zwischen Gebäuden und unter Einbezug von Parzellengrenzen von hoher Bedeutung.
- Innerhalb der räumlichen und örtlichen Gegebenheit kann mittels Reduktion der Lärmemissionen der Anwendungsbereich von mono- oder bivalenten Luft-Wasser-WP beeinflusst werden. Lärmemissionen können an der Quelle, mit Sekundärmassnahmen (R. Huber & Rügsegger, 2019; Marte, 2021) und durch eine Leistungsreduktion erreicht werden.
 - Quellenmassnahmen:
 - Wahl von leisen Produkten
 - Kaskadierung (zwei halb so grosse WP sind aus physikalisch-technisch-physiologischen Gründen weniger laut als eine grosse)

- Sekundärmassnahmen: Schalldämmhauben, Schalltrennwände, Einhausung sowie Sockeldämpfung und Luftschachtauskleidung (bei Innenaufstellung).
- Leistungsreduktion:
 - durch gebäudeseitige Massnahmen (eher beschränkt, eher nicht LICs) und/oder
 - durch bivalente Konfiguration: Leistungs- und damit Lärmreduktion um die Hälfte

Um quantitative Bedeutung der räumlichen Restriktionen und die Beiträge der genannten Lärm reduzierenden Massnahmen auf die Potenziale für Luft/Wasser Wärmepumpen aufzuzeigen, wird für die gesamte Schweiz eine Parameterstudie in einem Geographischen Informationssystem (GIS) durchgeführt.

Nachfolgend wird nur das Potenzial für die freie Aussenaufstellung der Wärmepumpe und nicht für eine Innenaufstellung oder eine Aussenaufstellung an der Hauswand berechnet. Damit soll der konservativste Fall abgebildet werden. Hierbei wird davon ausgegangen, dass neben dem eigenen Gebäude auch die umliegenden beheizten Gebäude vor Lärm geschützt werden müssen.

7.1.1 Methodisches Vorgehen in der Übersicht

Das methodische Vorgehen zur Bestimmung der Potenziale und Restriktionen von Luft/Wasser-WP umfasst folgende Schritte:

1. Abstecken des Untersuchungsgegenstands (Parameterraum): 3 Varianten mit je zwei Fallunterscheidungen mit unterschiedlichen Abstandsanforderungen, dies für je für drei verschiedene Gebäudetypen.
2. Berechnung der Abstände, welche für die Einhaltung der Lärmschutzanforderungen in diesen drei Varianten einzuhalten sind.
3. Gebäudescharfe Untersuchung, ob eine Luft/Wasser-WP möglich ist oder nicht (Eignung). Dies erfolgt für den abgesteckten Parameterraum (siehe Schritt 1) und für alle Gebäude des Kantons ZH.
4. Schätzung eines statistischen Modells für die Gebäude im Kanton ZH, ob sie sich für eine Luft/Wasser-WP eignet oder nicht (Eignungswahrscheinlichkeit). Die Eignungswahrscheinlichkeit wird durch verschiedene gebäudespezifische und strukturelle Attribute bestimmt. Die Auswahl der Attribute erfolgt auch im Hinblick auf die Hochrechnung auf die ganze Schweiz (siehe nächster Schritt)
5. Hochrechnung auf die Schweiz: Anwendung des statistischen Modells zur Eignungswahrscheinlichkeit auf die übrigen Gebäude der Schweiz.
6. Auswertung und Darstellung der Ergebnisse. Dies erfolgt auf Ebene EBF, auch im Hinblick auf die Verwendbarkeit als Input in die Gebäudeparkmodellierung

Auf die einzelnen Schritte sowie die Berechnungsgrundlagen und -annahmen wird nachfolgend näher eingegangen.

7.1.2 Methodik und Berechnungsgrundlagen und -annahmen im Einzelnen

Ausgehend von verschiedenen Studien und Messungen von Lärmemissionen bei Luft/Wasser-Wärmepumpen¹³ werden die Abstände abgeleitet, welche eingehalten werden müssen, um die Lärmschutz-Grenzwerte einzuhalten. Basierend auf diesen Grundlagen (aber ohne Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips, das im Einzelfall weitere Einschränkungen nach sich ziehen kann) und mit Verweis auf die grossen Unterschiede werden drei Varianten abgeleitet, für welche im Folgenden die Potenziale errechnet werden:

- **VARIANTE 1:** basierend auf Schlussbericht «Luft/Wasser-Wärmepumpen im Städtischen Bestand» der Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik der Stadt Zürich, Abbildungen 53 und 54: erforderlicher Abstand Quelle/Empfänger in Funktion der Nennheizleistung für die ESII bzw. ESIII.
- **VARIANTE 2:** basierend auf Schlussbericht Integration von Luft/Wasser-Wärmepumpen im städtischen Kontext der Fachhochschule Nordostschweiz, dem FWS-Schalldatenverzeichnis, sowie der Prüfergebnisse des Wärmepumpen Testzentrums (WTZ) in Buchs.
- **VARIANTE 3:** basierend auf Schallwerten der leisesten Geräte für Aussenaufstellung sowie Geräte, bei denen zusätzliche Schallschutzmassnahmen, wie z.B. punktuelle Schallschutzwände, umgesetzt wurden. Auch bivalente Ansätze können durch die damit verbundene Leistungsreduktion um ca. die Hälfte dazu beitragen, die Schallemissionen zu verringern.

Je nach Leistung und Gerätetyp, wie z.B. Splitgeräte oder Aussenaufstellung, sind die Lärmemissionen unterschiedlich, wobei es eine gewisse Korrelation zwischen Leistung, Gerätetyp und Lärmemissionen gibt. Diesbezüglich ist anzumerken, dass die Datenlage bei Geräten zwischen 20 und 50 kW Leistung ist jedoch lückenhaft ist (eine Liste des WP-Verzeichnisses der Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz stand für diese Analysen nicht zur Verfügung) und dass für Geräte > 50 kW nicht genügend Schallmessungen zur Verfügung stehen, weshalb WP mit mehr als 50 kW Leistung in diesem Kap. 7.1 nicht berücksichtigt und in der Tabelle 32 nur Abstände für Leistungen bis und mit 50kW angegeben sind. Dies impliziert jedoch nicht, dass für solche oberen Leistungsbereiche keine Luft/Wasser-WP möglich sind (siehe z.B. Varga et al. (2018) und Fallbeispiel 11 in AUE (2021)¹⁴).

Die Annahmen für die einzuhaltenden Abstände sind in Tabelle 32 aufgeführt und werden je nach Empfindlichkeitsstufe (ES) der zulässigen Belastungsgrenzwerte gemäss Lärmschutz-

¹³ Tool Lärmschutznachweis vom Fachverband Wärmepumpen Schweiz

Prüfergebnisse Luft/Wasser-Wärmepumpen des Wärmepumpen-Testzentrums (WPZ) der Ostschweizer Fachhochschule (Liste vom Juni 2021)

Schlussbericht Luft/Wasser- Wärmepumpen im städtischen Bestand, Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik der Stadt Zürich (2019)

Schlussbericht Integration von Luft/Wasser-Wärmepumpen im städtischen Kontext, Fachhochschule Nordostschweiz, im Auftrag der Stadt Zürich (2018)

¹⁴ Varga M. et al.(2018). Heizungsersatz durch Luft- Wasser-Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern – Übersicht über realisierte Projekte, Studien und Fördermittel der Kanton. EnergieZukunftSchweiz i.A. EnergieSchweiz, Bern, Dezember.

AUE (2021). Zwölf Beispiele innovativer Heizungslösungen Wärmepumpen in schwierigen Einbausituationen. Basel, Januar.

Verordnung¹⁵ in die Kategorien ESII und ESIII eingeteilt. Für die Zuordnung der Zonen zu ES II und ESIII wird der Datensatz „Bauzonen Schweiz (harmonisiert)“ auf dem Geoportal des Bundes (geo.admin.ch) verwendet. Dieser basiert auf den bei den kantonalen Fachstellen für Raumplanung am 1.1.2017 verfügbaren Geodaten zu den Bauzonen. Die kantonalen Zonentypen wurden gemäss dem minimalen Geodatenmodell Nutzungsplanung den neun Hauptnutzungen innerhalb der Bauzonen zugeordnet. Der Kategorie ESII werden für diese Studie die Gebäude in reinen Wohnzonen der harmonisierten Bauzonen der Schweiz zugeordnet, in der Kategorie ESIII sind die Gebäude in den anderen Bauzonen. Gebäude ausserhalb der Bauzonen und unbeheizte Gebäude werden nicht berücksichtigt. Dasselbe gilt für Gebäude, denen in der räumlichen Analyse keine EGID (Eidgenössische Gebäude-ID) zugeordnet werden konnte. Für Gebäude, welche mehr als 50 kW für die Wärmeerzeugung benötigen, wird vorläufig angenommen, dass diese nicht mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe beheizt werden.

Die Unterschiede sind insbesondere bei den höheren Leistungen und zwischen den Empfindlichkeitsstufen sehr gross. Zwischen den Varianten sind die Unterschiede ebenfalls gross und halbieren sich jeweils mehr oder weniger von der ersten zur zweiten und von der zweiten zur dritten Variante.

Tabelle 32 Angenommene Abstände in m für verschiedene Varianten von WP nach Leistung und Empfindlichkeitsstufen

Leistungs- bereich	Variante 1		Variante 2		Variante 3	
	ESII	ESIII	ESII	ESIII	ESII	ESIII
Bis 10 kW	8	5	4	2.4	2	1.2
10 – 20 kW	16	9	7	4.2	4	2.4
20 – 35 kW	27	16	12	7.2	6	3.6
35 – 50 kW	38	22	22	13.2	10	6

Quelle: Schlussbericht Luft/Wasser- Wärmepumpen im städtischen Bestand, Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik der Stadt Zürich (2019) (Variante 1); Schlussbericht Integration von Luft/Wasser-Wärmepumpen im städtischen Kontext, Fachhochschule Nordostschweiz, im Auftrag der Stadt Zürich (2018) (Variante 2); leise Split-Wärmepumpen gemäss Schalldatenverzeichnis FWS (Variante 3)

Anhand der im GPM gebäudescharf berechneten Energieverbräuche wird jedes Gebäude der entsprechend benötigten WP-Leistungsklasse zugewiesen. Auf der Basis von öffentlich zugänglichen GIS-Daten des Bundes und des Kantons Zürich werden in einer räumlichen Analyse mit einem eigens entwickelten Verfahren zusätzlich folgende Attribute für jedes Gebäude eruiert:

- Bauzone, in der das Gebäude liegt, gemäss den harmonisierten Bauzonen der Schweiz. Unterschieden werden Wohnzonen (ESII) und alle anderen Bauzonen (ESIII)

¹⁵ Lärmschutz-Verordnung (LSV) 814.41: https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1987/338_338_338/de

- Dichte der Energiebezugsflächen pro Fläche der jeweiligen Bauzone, in der das Gebäude steht (Überbauungsdichte)
- Anzahl Einwohner der Gemeinde, in der das Gebäude steht

Die folgenden beiden Attribute werden auf dem GPM von TEP Energy bestimmt, welches auf öffentlich verfügbaren Daten und sowie zahlreichen Projektberichten fusst:

- Gebäudetyp: Einfamilienhaus (EFH), Mehrfamilienhaus (MFH), Nicht-Wohngebäude (NWG)
- Energiekennzahl

Für die Berechnung des gesamtschweizerischen WP-Potenzials wird ein statistisches Modell angewendet, welches aus Daten des Kantons ZH abgeleitet wird und anschliessend für die gesamte Schweiz angewandt wird (Spezifikation und Ergebnisse siehe unten und im Anhang im Kap. 11.2.1).

Die Grundlagen für das statistische Modell basieren auf räumlichen Analysen im Kanton Zürich, woraus sich für jedes Gebäude berechnen lässt, ob eine WP möglich ist oder nicht. Dazu werden die GPM-Daten mit den Daten der amtlichen Vermessung (AV) des Kantons Zürich in Übereinstimmung gebracht und für jedes energierelevante Gebäude, je nachdem in welcher ES-Zone es liegt, Abstandspuffer um den Gebäudegrundriss gebildet. Je nach benötigter Leistung der WP wird die entsprechende Abstandsfläche von der jeweiligen Parzellengrösse abgezogen. Ist die verbleibende Fläche genügend gross, wird davon ausgegangen, dass eine WP möglich ist. Die für eine WP benötigte Fläche auf der Parzelle wird je nach Leistung gemäss Tabelle 33 definiert.

Tabelle 33 Benötigte Mindestfläche auf der Parzelle nach Abzug der Abstandspereimeter je nach Leistungsbereich der Wärmepumpe

Leistungsbereich	Mindestfläche auf Parzelle
Bis 10 kW	4 m ²
10 – 20 kW	8 m ²
20 – 35 kW	12 m ²
35 – 50 kW	16 m ²

Quelle: Annahmen TEP Energy

Die räumliche Analyse ist beispielhaft in Abbildung 31 dargestellt. Je nach Energieverbrauch (tief, mitteltief, mittelhoch oder hoch) ist der entsprechende Abstand (tief, mitteltief, mittelhoch oder hoch) einzuhalten. Massgebend für die Möglichkeit einer WP ist die verbleibende Parzellenfläche nach Abzug des entsprechenden Abstandspereimeters. Daraus wird ersichtlich, dass die verbleibende Parzellenfläche bei Gebäuden mit tiefem Energieverbrauch (blau eingefärbte Gebäude) und entsprechend tiefen Abständen (dunkelviolet) tendenziell ausreichend ist für eine WP (grüner Punkt), hingegen bei Gebäuden mit hohem Energieverbrauch (gelbe Gebäude) unter Einhaltung der entsprechenden Abstände (hellgelb) ist meist keine Wärmepumpe möglich. Eine Mindestbreite der verbleibenden Fläche wurde nicht berücksichtigt. So ist es theoretisch möglich, dass ein Streifen von wenigen cm

Breite aber mit mehreren Metern Länge die Mindestfläche erreicht, jedoch aufgrund der tiefen Breite eigentlich keine WP möglich ist. Dieser Fall dürfte jedoch eher die Ausnahme sein, weshalb er hier nicht berücksichtigt wurde.

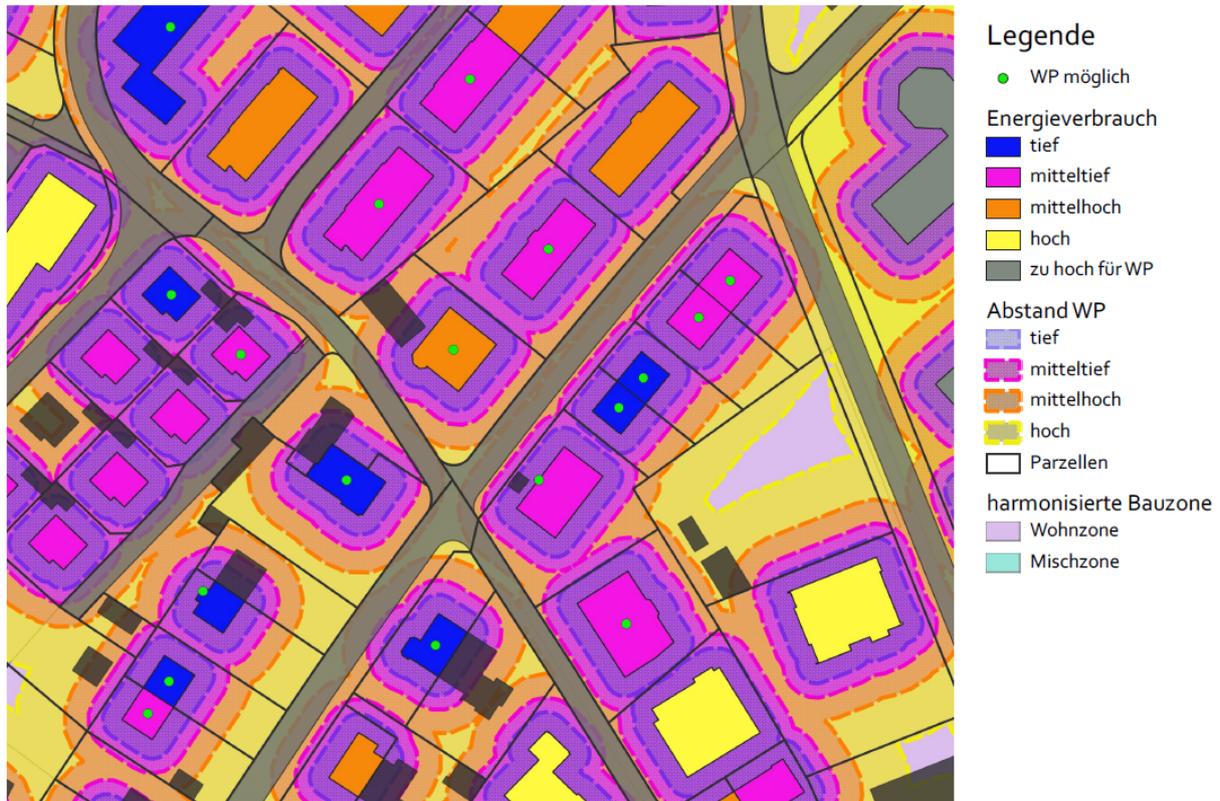


Abbildung 31: Beispielhafte Darstellung des Vorgehens bei der Ermittlung des WP-Potenzials für die Aussenaufstellung. Je nach Energieverbrauch (tief, mitteltief, mittelhoch oder hoch) ist der entsprechende Abstand (tief, mitteltief, mittelhoch oder hoch) einzuhalten. Massgebend für die Möglichkeit einer WP ist die verbleibende Parzellenfläche nach Abzug des entsprechenden Abstandsperimeters.

Aus den so für den Kanton ZH berechneten Daten lässt sich mittels Logit-Ansatzes ein statistisches Modell ableiten, welches die Wahrscheinlichkeit berechnet, mit welcher eine WP grundsätzlich möglich ist. Folgende Einflussfaktoren weisen eine hohe statistische Signifikanz auf, von 0 verschieden zu sein (siehe Resultate im Anhang 2.1):

- harmonisierte Bauzone (Wohnzonen und andere Zonen)
- m² EBF pro Bauzonengrösse (Überbauungsdichte)
- Gebäudetyp: Einfamilienhaus (EFH), Mehrfamilienhaus (MFH), Nicht-Wohngebäude (NWG)
- Energiekennzahl

Mit Hilfe dieses statistischen Modells kann sämtlichen energierelevanten Gebäuden aus dem GPM eine Eignungswahrscheinlichkeit für eine WP zugeteilt werden. Im Verhältnis der Eig-

nungswahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Einflussfaktoren (unabhängige Variablen des statistischen Modells) wird stochastisch jedem Gebäude ein WP-Potenzial zugeteilt. Mittels Verknüpfung dieses Ergebnisses mit dem Energieverbrauch der Gebäude kann das Gesamtpotenzial berechnet und nach verschiedenen Kategorien ausgewertet werden.

7.1.3 Strukturierung des Gebäudeparks nach Gebäudetypen und nach Lärmschutzaspekten

Um die Relevanz der wichtigsten Einflussfaktoren aufzuzeigen, wird nachfolgend der Gebäudepark nach Gebäudetypen und Lärmschutzaspekten strukturiert, dies zunächst für den Kanton ZH (Basis für die Schätzung des statistischen Modells) und für die gesamte Schweiz.

Von total etwa 340'000 Gebäuden, die im GWR des Kantons Zürich erfasst sind, werden im GPM nur ca. 146'000 als energierelevant im GPM abgebildet. Von den 146'000 Gebäuden mit modellierten Energieverbrauch konnten 800 Gebäuden keine EGID zugewiesen werden, weil die Punktkoordinaten im GWR nicht innerhalb der Gebäudeflächen der Daten der Amtlichen Vermessung (AV) lagen. Weitere ca. 600 Gebäude liegen ausserhalb der Bauzonen und werden deshalb für diese Analyse ebenfalls nicht berücksichtigt.

Kanton ZH

Im Kanton Zürich verteilen sich die Energiebezugsflächen (EBF) auf die Gebäudetypen Mehrfamilienhaus (MFH), Einfamilienhaus (EFH) und Nicht-Wohngebäude (NWG) wie in Abbildung 32 dargestellt. Am grössten Anteil der EBF befindet sich in den MFH, während die EFH am wenigsten EBF aufweisen. Hingegen verteilt sich die Fläche unterschiedlich auf die Empfindlichkeitsstufen (ES). In der ESII, also in den reinen Wohnzonen, befinden sich vor allem EBF von MFH und EFH und fast keine von NWG. In der ESIII, also in den übrigen Bauzonen, beträgt die Summe der EBF von MFH fast gleich viel wie diejenige der NWG, hingegen ist die EBF von EFH deutlich geringer.

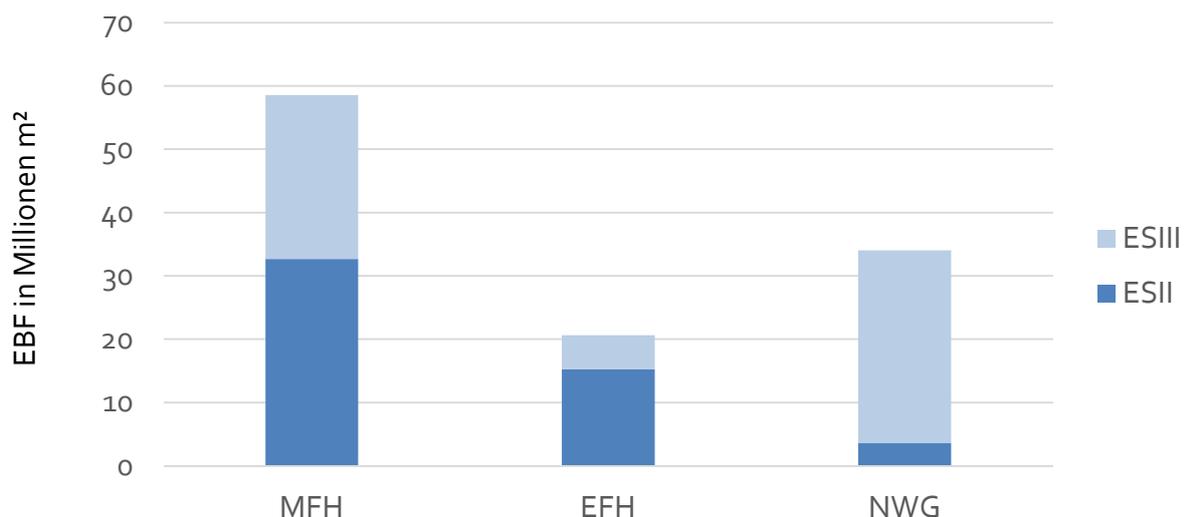


Abbildung 32: Summe der Energiebezugsflächen (EBF) in m² nach den Gebäudetypen Mehrfamilienhaus (MFH), Einfamilienhaus (EFH) und Nicht-Wohngebäude (NWG) und nach Empfindlichkeitsstufen (ES) II und III im Kanton Zürich.

Die gleiche Verteilung nach Anzahl Gebäude anstelle von m² EBF ergibt ein etwas anderes Bild (siehe Kap. 11.2.2 im Anhang): die Anzahl beheizte NWG ist viel tiefer als die Anzahl MFH und EFH. Die Anzahl EFH ist deutlich höher als die der MFH, und somit ist auch die Anzahl Gebäude in der ESII wesentlich höher als diejenige in der ES III.

Gesamtschweiz

Für die gesamte Schweiz liegen aus dem GPM für 1'600'000 Gebäude Energieverbräuche und Energiebezugsflächen vor. Davon liegen wiederum einige ausserhalb der Bauzonen. Deshalb und aus Gründen von Dateninkonsistenzen kann die harmonisierte Bauzone und die den Zonen zugeordneten Attribute (z.B. Bebauungsdichte in der Zone) nur für 1'400'000 Gebäude zugeordnet werden. Diese verteilen sich ähnlich wie im Kanton Zürich wie in Abbildung 33 dargestellt auf die Typen MFH, EFH und NWG und auf die ESII und ESIII, wobei die EFH gesamtschweizerisch (relativ gesprochen) eine höhere Bedeutung haben.

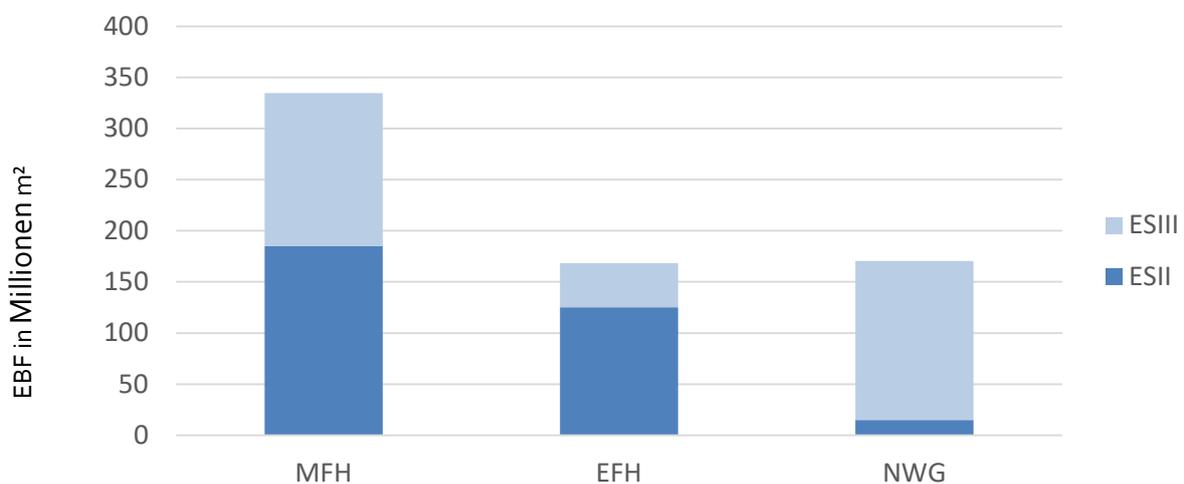


Abbildung 33: Summe der Energiebezugsflächen (EBF) in m² nach den Gebäudetypen Mehrfamilienhaus (MFH), Einfamilienhaus (EFH) und Nicht-Wohngebäude (NWG) und nach Empfindlichkeitsstufen (ES) II und III in der gesamten Schweiz.

Wie im Kanton Zürich ist die Anzahl Gebäude bei den EFH gesamtschweizerisch am höchsten (siehe Kap. 11.2.2 im Anhang). Auffällig ist, dass die Anzahl NWG im Verhältnis zu den anderen Gebäudetypen über die gesamte Schweiz gesehen noch geringer ist als im Kanton Zürich. Die Anzahl Gebäude in der ESII ist wiederum wesentlich höher als diejenige in der ESIII.

7.1.4 Ergebnisse der Parameterstudie

Die Ergebnisse der Parameterstudie zeigen grosse Unterschiede zwischen den drei Varianten aufgrund der unterschiedlichen angenommenen Abstände. Abbildung 34 zeigt einen räumlichen Ausschnitt der Ergebnisse für die drei Varianten. Die grünen Punkte stellen die Gebäude dar, bei denen bei allen Varianten eine WP möglich ist. Bei den Gebäuden mit den gelben Punkten sind für die Variante 1 keine WP möglich, hingegen für die Varianten 2 und 3 schon. Die blauen Punkte stehen für Gebäude, bei denen nur bei der Variante 3 mit den leisen Gerä-

ten eine WP möglich ist. Bei der Variante 1 sind aufgrund der hohen erforderlichen Abstände entsprechend am wenigsten Gebäude für eine WP geeignet. Bei der Variante 2 sind deutlich mehr, und bei der Variante 3 am meisten Gebäude für eine WP geeignet.



Abbildung 34: Ausschnitt aus den Ergebnissen der Berechnung des WP-Potenzials für die drei Varianten.

Die Unterschiede je nach Variante und Gebäudetyp sind für die gesamte Schweiz in Abbildung 35 aufgeführt. Insbesondere bei den MFH und EFH zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen der Variante 1 und den Varianten 2 und 3. Bei den EFH ist bereits in der Variante 2 für fast alle Gebäude eine WP möglich, weshalb in der Variante 3 praktisch keine EFH mit WP dazukommen.

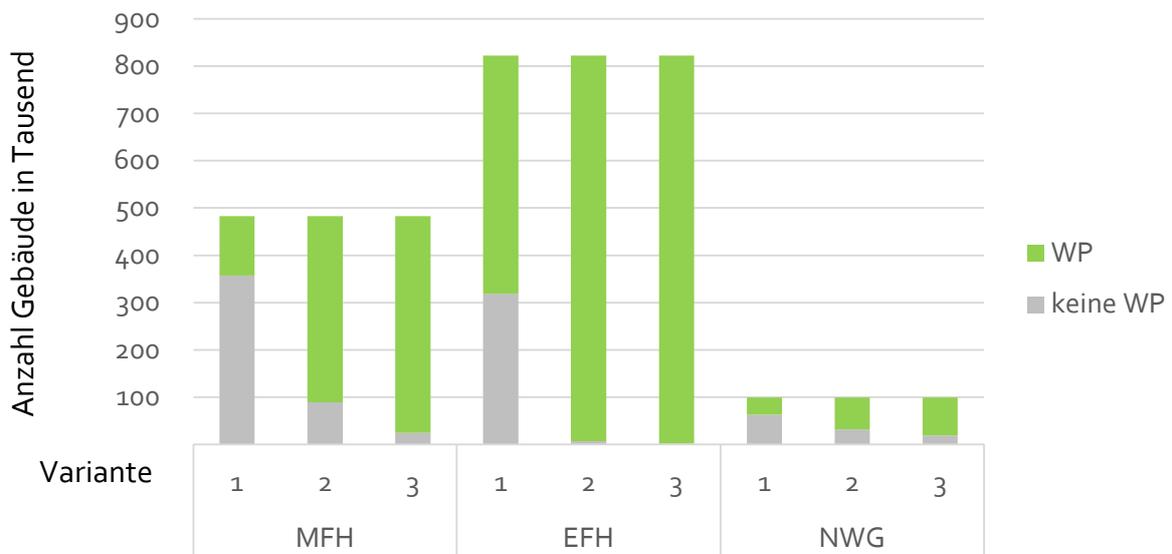


Abbildung 35: Anzahl Gebäude mit WP und ohne WP für die Varianten 1 – 3 nach Gebäudetypen Mehrfamilienhaus (MFH), Einfamilienhaus (EFH) und Nicht-Wohngebäude (NWG) für die gesamte Schweiz.

Die gleiche Darstellung nach EBF in Mio. m² zeigt für die gesamte Schweiz die Unterschiede je nach Variante und Gebäudetyp noch deutlicher (siehe Abbildung 36). Der Anteil EBF bei den NWG ist hier viel Grösser, wahrscheinlich weil wenige Gebäude sehr grosse EBFs aufweisen und somit der Energieverbrauch zu gross ist für eine WP. Wiederum zeigen sich bei den MFH und EFH deutliche Unterschiede zwischen der Variante 1 und den beiden anderen Varianten.

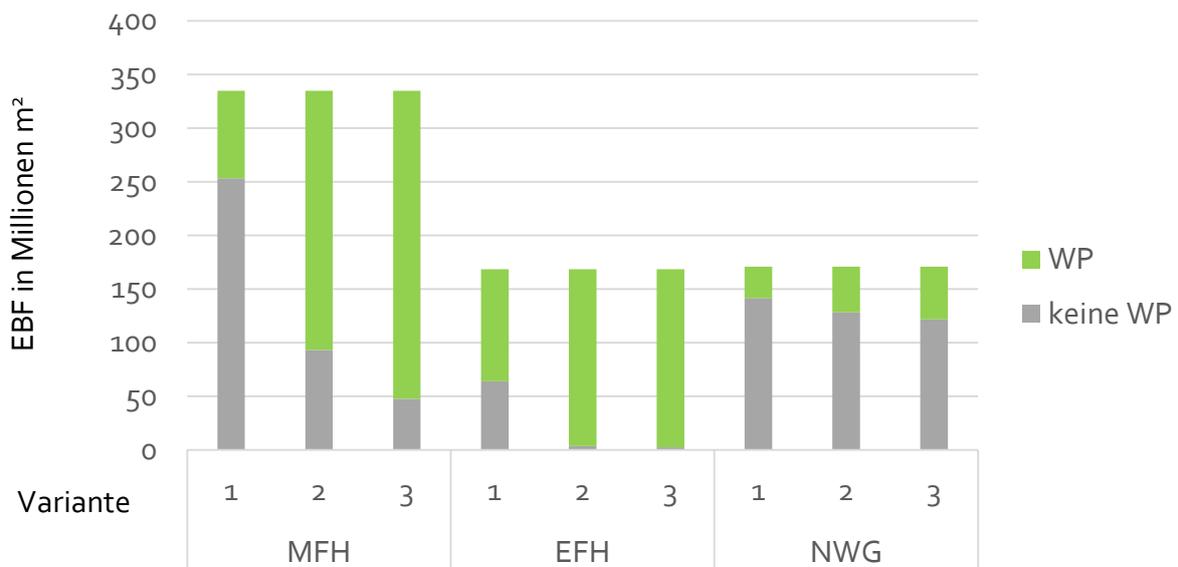


Abbildung 36: Energiebezugsflächen (EBF) in Millionen m² mit WP und ohne WP für die Varianten 1 – 3 nach Gebäudetypen Mehrfamilienhaus (MFH), Einfamilienhaus (EFH) und Nicht-Wohngebäude (NWG) für die gesamte Schweiz.

In Abbildung 37 sind die EBF-Anteile mit und ohne WP-Eignung in Prozent für die beiden Empfindlichkeitsstufen (ES) und die drei Varianten dargestellt.¹⁶ Bei der Variante 1 sind fast keine Unterschiede zwischen den ESII und ESIII ersichtlich. Bei den Varianten 2 und 3 hingegen sind die Unterschiede zwischen den ES gross, dafür sind die Unterschiede zwischen den Varianten viel geringer.

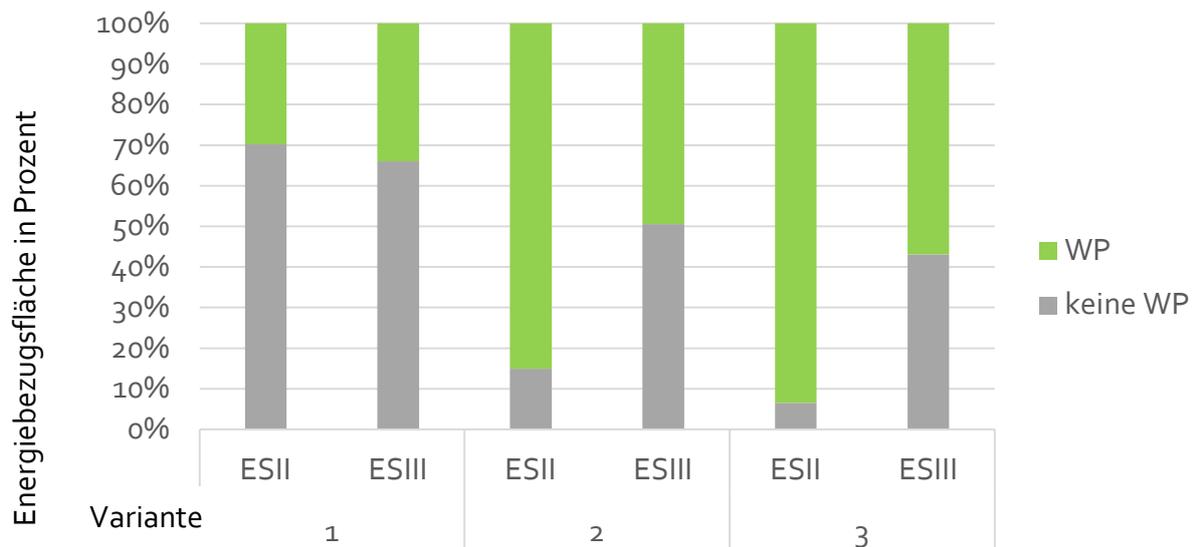


Abbildung 37: Anteil der EBF mit und ohne WP für die Varianten 1 – 3 nach Empfindlichkeitsstufen (ES) II und III für die gesamte Schweiz.

Abschliessend wird aufgezeigt, dass die Anzahl Gebäude mit WP-Eignung stark von der Leistung der benötigten WP abhängig ist. Dieser Anteil unterscheidet sich insbesondere zwischen der Variante 1 und den beiden anderen Varianten (siehe Abbildung 38). Die Anzahl Gebäude mit einer WP-Leistung bis 20 kW ist erwartungsgemäss bei den EFHs am grössten, und entsprechend den geringeren benötigten Abständen bei kleineren WPs ist dort auch die Anzahl Gebäude mit WP viel grösser als bei grösseren WP-Leistungen.

¹⁶ Im Kap. 11.2.3 sind Auswertungen der Ergebnisse zur WP-Eignung differenziert nach Empfindlichkeitsstufen in absoluten Grössen (Tsd. Gebäude, Mio. m² EBF) zu finden.

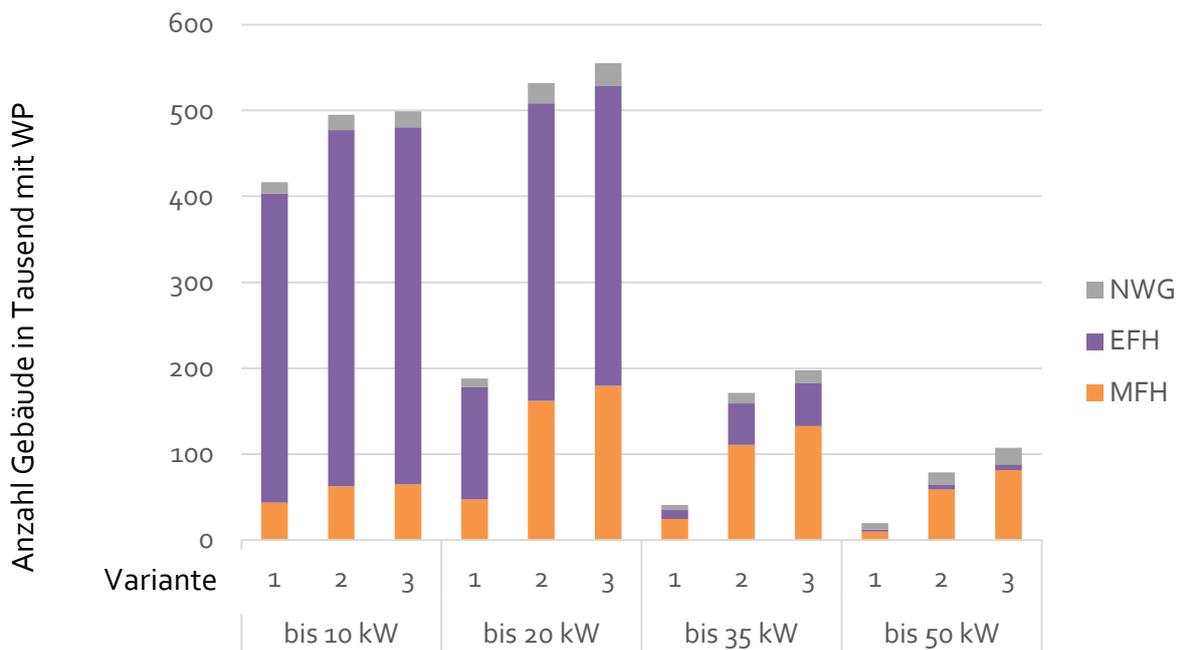


Abbildung 38: Anzahl Gebäude mit WP für die Varianten 1 – 3 nach Leistungsklasse der WP in kW und nach Gebäudetyp Mehrfamilienhaus (MFH), Einfamilienhaus (EFH) und Nicht-Wohngebäude (NWG) für die gesamte Schweiz.

7.1.5 Fazit

Die Anforderungen an den Lärmschutz zu nicht-vernachlässigbaren Einschränkungen, was die Nutzung von Luft/Wasser-WP betrifft. Einschränkungen können gut 50% bis 70% der EBF betreffen (siehe Abbildung 37), je nach Empfindlichkeitsstufe und je nach Anforderung (siehe Unterschiede zwischen Varianten 1 und 2 gemäss Definition in Kap. 7.1.2). Weitere Einschränkungen können sich fallweise ergeben, falls die Einhaltung bzw. Einforderung oder Durchsetzung des Vorsorgeprinzips in der Praxis stark relevant wird (das Vorsorgeprinzip gebietet im Wesentlichen, alle Möglichkeiten der Lärmvermeidung zu prüfen). Durch die Wahl von leiseren Wärmepumpen können die Einschränkungen auf 10% bzw. 40% der EBF reduziert werden (ES II bzw. ES III). Auch bivalente Ansätze können durch die damit verbundene Leistungsreduktion dazu beitragen, die Schallemissionen zu verringern und die Einsatzmöglichkeit der Luft/Wasser-WP zu erhöhen. Die Einschränkungen würden sich auch verringern, wenn bei der Beurteilung der Lärmsituation der Kontext, d.h. andere Lärmquellen berücksichtigt werden (beispielsweise gehen beim Vorhandensein von laueren Lärmquellen die Emissionen der leiseren Quellen vereinfacht formuliert unter; z.B. addieren sich 45 dB und 55 dB zu 55.4 dB, was einem nicht hörbaren Unterschied entspricht, denn das menschliche Ohr kann nur Unterschiede von mehr als 2 bis 3 dB wahrnehmen).

7.2 Auswirkungen verschiedener Einflussgrössen auf Ergebnisindikatoren auf der Gebäudeparkebene

7.2.1 Fragestellungen und Untersuchungsansatz

Um die Relevanz der in diesem Projekt durchgeführten Analysen zu verschiedenen Einflussgrössen wie Leistungsberechnung, Kostenkennwerte, LICS, Lärmaspekte auf die Gebäudeparkebene aufzuzeigen, werden mit dem GPM verschiedene Modellläufe (ML) durchgeführt. Bezugnehmend auf die einleitend formulierten Fragestellungen und Zielsetzungen dieses Projekts sollen damit die Auswirkungen dieser Einflussgrössen auf folgende Ergebnisindikatoren aufgezeigt werden:

- Nutzenergie Wärme
- Endenergie pro Heizsystem
- Endenergie pro Energieträger
- Emissionen
- Installierte Leistung
- Investitionskosten
- Jahreskosten

Konkret werden nachfolgende Fragestellungen untersucht:

1. Art der Leistungsberechnung: welche Auswirkung hat die Berechnung der Wärmeleistung gemäss prSIA 384/1:2021 im Vergleich zum bisherigen Berechnungsansatz gemäss SIA 384/2?
2. Welche Auswirkung hat die Aktualisierung der Kostenkennwerte auf die Ergebnisse?
3. Was bewirkt eine Anforderung zur Begrenzung der CO₂-Emissionen auf 6 kg CO₂/m² (zum Zeitpunkt einer fälligen Heizungserneuerung)
4. Welche Veränderungen werden durch den Einzug der LICS, insbesondere bivalente WP, bewirkt?
5. Können leise (monovalente) WP-Lösungen wie z.B. leise WP-Produkte oder spezifische Schallschutzmassnahmen das Potenzial der Luft/Wasser-WP entscheidend vergrössern?

Folgende Einschränkungen und Präzisierungen sind bzgl. des zweiten Punkts zur Aktualisierung der Kostenkennwerte zu beachten: Untersucht wird die Aktualisierung im Bereich Heizanlagen (inkl. des Einbezugs neuer Lösungen gemäss LICS). Grund: der Fokus bei der Kostenaktualisierung lag auf der Gebäudetechnik und die Kostenkennwerte im Bereich Gebäudehülle konnten im Rahmen dieses Projekts nur punktuell aktualisiert werden.

Um diese fünf Fragestellungen zu untersuchen, werde nachfolgend sechs verschiedene Modellläufe (ML) definiert, wobei der ML₁ als Ausgangslage und Referenz dient (ML₁ bildet die Datenlage und den Modellstand vor der Umsetzung der o.g. Punkte ab). Bei jedem der ML ein zusätzlicher Einflussfaktor verändert wird. Durch eine Differenzbetrachtung zum jeweils vorangehenden ML kann der Effekt des jeweils veränderten Einflussfaktors aufgezeigt werden. In Tabelle 34 ist die Definition der mit dem GPM durchgeführten Modellläufe synoptisch dargestellt, wobei der jeweils veränderte Einflussfaktor fett hervorgehoben ist.

Tabelle 34 Definition der mit dem GPM durchgeführten Modellläufe (ML)

	Leistungs- berechnung	Kosten- kennwerte	Anforderung < 6 kg CO ₂ /m ²	Ohne/mit LICS	Leise WP ja/nein
ML1 (Referenz)	SIA 384/2	Bisher	Nein	Ohne	Nein
ML2	prSIA 384/1:2021	Bisher	Nein	Ohne	Nein
ML3	prSIA 384/1:2021	Aktualisiert	Nein	Ohne	Nein
ML4	prSIA 384/1:2021	Aktualisiert	Ja	Ohne	Nein
ML5	prSIA 384/1:2021	Aktualisiert	Ja	Mit	Nein
ML6	prSIA 384/1:2021	Aktualisiert	Ja	Mit	Ja

Quelle: TEP Energy, dieses Projekt

Bevor in den Unterkapiteln 7.2.3 bis 7.2.9 auf die erwähnten Ergebnisgrössen im Einzelnen eingegangen wird, werden im folgenden Unterkapitel 7.2.2 die wichtigsten Berechnungsgrundlagen und Annahme dokumentiert bzw. referenziert.

7.2.2 Wichtige Berechnungsgrundlagen, Prämissen und Annahmen

Zur Interpretation der Modellergebnisse ist es nützlich, sich die wichtigsten Berechnungsgrundlagen, Prämissen und Annahmen bewusst zu sein. Dies ergeben sich teilweise aus der Fragestellung (siehe Kap. 7.2.1) und teilweise aus den durchgeführten Analysen (z.B. zu den Kostenkennwerten, den LICS-Ansätzen, den Potenzialen der Luft/Wasser-WP etc.), teilweise werden sie normativ festgelegt bzw. von anderen Quellen übernommen, im Einzelnen wie folgt:

- Stand und Entwicklung des Mengengerüsts (EBF) gemäss WIS-Studie und in Anlehnung an die Energieperspektiven 2050+ (invariant zwischen den verschiedenen Modellläufen):
 - Absolut: Vergangene und künftige Flächennachfrage (siehe Abbildung 43). Bei den Wohngebäuden wird von einer stärkeren Zunahme, bei den DL-Gebäuden von derselben Zunahme wie in den EP 2050+ ausgegangen.
 - Strukturell: EBF im Jahr 2000 nach Bauperiode und Heiz- und Warmwassersystem, basierend auf Daten des GWR und von TEP Energy, erarbeitet in verschiedenen Projekten
 - Strukturell: Abrisstätigkeit und Ersatzneubau gemäss Annahmen TEP Energy
- Entwicklung der energie- und klimapolitischen Rahmenbedingungen:
 - In Anlehnung an das Szenario «Weiter Wie Bisher» (WWB) der Energieperspektiven 2050+ bzw. des Referenz-Szenarios der WIS-Studie für die Modellläufe 1 bis 3
 - Anforderung max. 6 kg CO₂ pro m² EBF im Fall einer fälligen Heizungssanierung Modellläufe 4 bis 6
 - Keine weiteren energie- und klimapolitischen Instrumente (wie z.B. eine Erhöhung der CO₂-Abgabe)

- Annahmen zu Energiepreisen und ihrer Entwicklung, ausgehend von den Annahmen in Tabelle 11.
- Technische Beschreibung des Gebäudeparks im Ausgangsjahr: Gebäudeform gemäss Auswertungen des 3D-Modells von swisstopo, U-Werte gemäss diversen Ausgaben von SIA 380/1 und weiteren Datenquellen.
- Techno-ökonomische Daten der Effizienzmassnahmen und der Heiztechnologien gemäss diversen früheren Erhebungen (Modellläufe 1 und 2) bzw. gemäss den Ergebnissen der Erhebungen in diesem Projekt (Modellläufe 3 und 6). Annahmen zu Investitionskosten siehe Abbildung 47 und Abbildung 48 im Anhang.
- Mögliche Verfügbarkeit von Energiequellen und mögliche Eignung von Heiztechnologien:
 - Gasnetz: unterschiedlich je nach Gebäudetyp (siehe Tabelle 35) gemäss Auswertungen von TEP Energy im Rahmen diverser Projekte, namentlich der Energieperspektiven 2050+. Unverändert zwischen 2020 und 2050, d.h. es wird kein expliziter Rückbau der Gasversorgung unterstellt.
 - Nah- und Fernwärme: gemäss Annahmen ansteigend zwischen 2020 und 2050, siehe Tabelle 35.
 - Wärmepumpen: Eignung für Luft/Wasser-WP gemäss Analysen in diesem Projekt (Kap. 7.1), Einschränkungen bzw. Nicht-Einschränkung von Erdwärmesonden-WP gemäss Auswertungen von kantonalen GIS-Datensätzen als Bestandteil der Räumlichen Energieanalysen (REA) von TEP im Rahmen diverser Projekte (u.a. WIS-Studie und EP 2050+).
 - Biomasse (Holz, Biogas): im Gegensatz zu den EP 2050+ wird in diesem Projekt die Verfügbarkeit von Biomasse für den Gebäudesektor nicht restringiert, d.h. es werden keine übergeordneten strategischen Überlegungen zur optimalen Verwendung von Biomasse getroffen. Motivation dieser Annahme: der Effekt der zu untersuchenden Einflussfaktoren soll möglichst unverfälscht erfolgen und möglichst gut und einfach nachvollziehbar sein.
 - Dem Modell werden keine synthetisch-erneuerbare Gas- oder Brennstoffe wie Power to Gas (PtG) oder Power to Liquid (PtL) zur Verfügung gestellt.

Mit den obenstehend aufgeführten Annahmen wird die Entwicklung des Gebäudeparks zwischen 2000 und 2050 berechnet. Die energetische Erneuerung der Gebäudehüllenelemente und die Entwicklung der Heiz- und Warmwassersysteme und damit der Energieträger wird endogen modelliert, dies ausgehend von Annahmen zu Instandsetzungs- und Erneuerungszyklen und basierend auf den Kosten der Effizienzmassnahmen und Heiztechnologien, der Energiepreise sowie der Verfügbarkeit und Restriktionen (z.B. zu den CO₂-Emissionen) zum jeweiligen Entscheidungszeitpunkt zwischen 2020 und 2050 (pro memoria: beim GPM kommt ein sog. Repräsentantenansatz zur Anwendung, siehe Nägeli et al., (2018), Nägeli et al., (2019) und Nägeli et al., (2020a) für Details).

Der Transparenz halber, d.h. um die oben erwähnten zu untersuchenden Einflussfaktoren möglichst unverfälscht sichtbar machen zu können, wird auf eine Kalibrierung bzw. eine Skalierung der Modellergebnisse verzichtet. Dies bedeutet, dass es bereits im Jahr 2020 zu

unterschiedlichen Ergebnissen kommen kann und dass es zwischen diesen Ergebnissen und statistischen Grundlagen zu Abweichungen kommen kann.

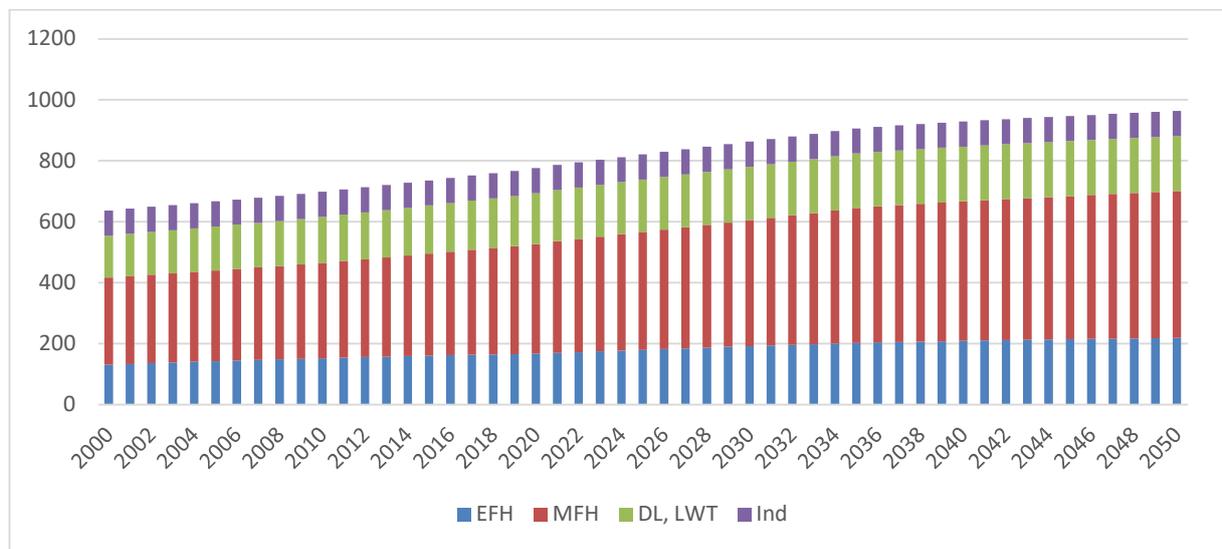


Abbildung 39: EBF-Entwicklung für die vier Gebäudesektoren Einfamilienhaus (EFH), Mehrfamilienhaus (MFH), Dienstleistungen und Landwirtschaft (DL, LWT) sowie Industrie (Ind).

Tabelle 35 Grundlagen für die Modellierung der Verfügbarkeit von Energieträgern bzw. -quellen (Angaben in %)

	2020				2050 Modellläufe 1 bis 5				2050 Modelllauf 6			
	EFH	MFH	DL	Ind	EFH	MFH	DL	Ind	EFH	MFH	DL	Ind
Wärmepumpeneignung												
Erdwärmesonden-WP	78.5	73.4	68.1	39.4	78.7	69.5	65.1	35.7	78.7	69.5	65.1	35.7
Luft/Wasser-WP	97.5	87.4	76.9	38.7	77.7	68.7	60.8	27.1	91.4	86.8	79.8	33.8
Siedlungsstruktur												
Zentrumszone	14.9	17.6	21.6	5.0	14.6	19.8	21.7	3.8	14.6	19.8	21.7	3.8
Gas versorgtes Gebiet	58.0	69.3	79.4	50.0	57.4	74.9	82.3	51.3	57.4	74.9	82.3	51.3
Potenzial thermische Netze , unterschieden nach Nahwärme (NW) bzw. Fernwärme (FW)												
Ohne FW/NW	78.5	73.4	68.1	39.4	78.7	69.5	65.1	35.7	78.7	69.5	65.1	35.7
NW	91.0	84.7	75.8	88.6	98.8	93.5	82.7	89.9	98.8	93.5	82.7	89.9
FW	3.7	4.4	4.0	2.2	0.5	1.4	2.1	1.8	0.5	1.4	2.1	1.8
	5.3	10.8	20.2	9.2	0.8	5.1	15.2	8.3	0.8	5.1	15.2	8.3

Quelle: Räumliche Energieanalysen (REA) von TEP Energy, dieses Projekt

7.2.3 Nutzenergie Raumwärme und Warmwasser

Die nachfolgenden Ergebnisse auf Ebene Endenergie und CO₂-Emissionen werden zum einen durch die Entwicklung der Energiebezugsflächen (EBF) bestimmt und zum anderen durch die Entwicklung des Nutzenergiebedarfs. Der Zeitverlauf beider Einflussfaktoren ist bei allen sechs Modellläufen identisch, die EBF definitionsgemäss und die Nutzenergie als Ergebnis der Modellrechnungen. Grund: die wesentlichen Einflussfaktoren wie beispielsweise Kostenkennwerte Gebäudehülle, Energiepreise, Innentemperaturen, Warmwasserbedarf pro Person, welche Nutzenergie von Raumwärme und Warmwasser beeinflussen, zwischen den Modellläufen invariant sind. Aus diesem Grund werden nachfolgend bei der Nutzenergie nur die Ergebnisse des Referenzlaufs (ML 1) dargestellt.

Die EBF stieg bei den Wohngebäuden in den zwanzig Jahren zwischen 2000 und 2020 um 24% (bei den EFH gar um 28%, bei den MFH um 22%) und im DL-Sektor um 22%. Mit Verweis auf Bevölkerungs- und Beschäftigtenwachstum sowie von strukturellen Änderungen wird die EBF bis 2050 weiter ansteigen (siehe Abbildung 43 und entsprechende Ausführungen im technischen Bericht zu den Energieperspektiven 2050+). Vorliegend wird bei den Wohngebäuden von einem Zuwachs von gut +30% ausgegangen und beim DL-Sektor von knapp 10%.

Die Nutzenergie Wärme wird klar von der Raumwärme dominiert, sowohl in der Vergangenheit (2000) als auch künftig. Allerdings nimmt die Bedeutung des Warmwassers zu und sein Anteil steigt von 12% im Jahr 2000 auf 22% im Jahr 2050.¹⁷ In der Summe geht die Nutzenergie Wärme zwischen 2000 und 2050 in allen betrachteten Gebäudesegmenten und in allen Betrachtungsperioden zurück. Dies gilt nicht nur für die in Abbildung 40 dargestellten Segmenten, sondern auch für die beiden Kategorien EFH und MFH (siehe Tabelle 36).

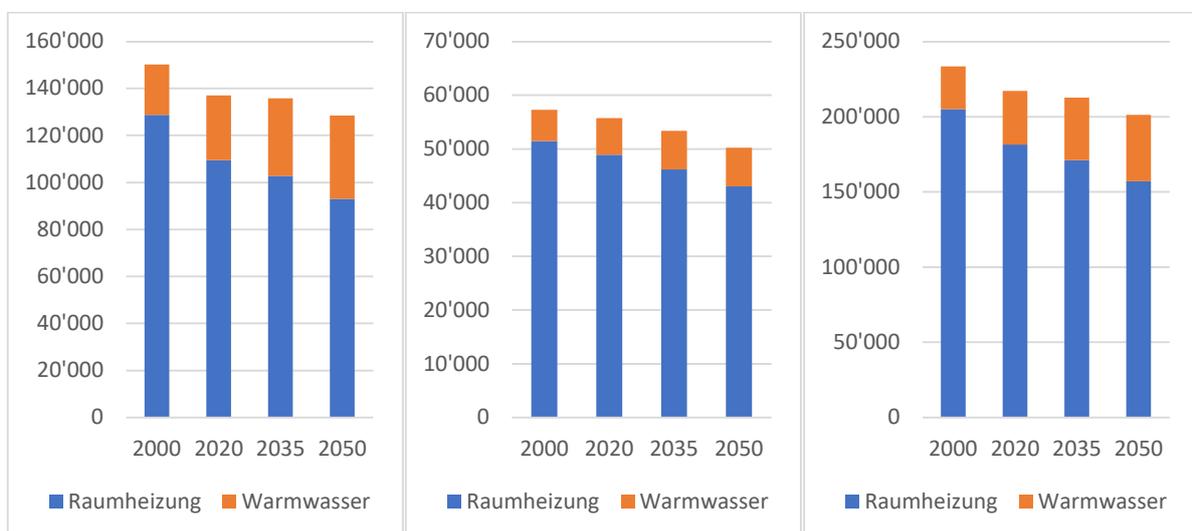


Abbildung 40: Entwicklung des Nutzenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser (TJ) für Wohngebäude (links), DL-Gebäude (Mitte) und alle Gebäudetypen inkl. Industriegebäude (rechts)

¹⁷ Anzumerken ist, dass auf Stufe Endenergie das Warmwasser ein höheres Gewicht hat, weil die Nutzungsgrade in diesem Bereich tiefer sind.

Gemäss den Berechnungen mit dem GPM ging die Nutzenergie für Raumwärme in allen Gebäudekategorien zwischen 2000 und 2020 zurück (zwischen 5% und 18%, siehe Tabelle 36), währendem die Nutzenergie für Warmwasser stieg (zwischen 17% und 28%). Die Entwicklung bei der Raumwärme kann auf die energetische Gebäudeerneuerung und Ersatzneubauten zurückgeführt werden, welche das Flächenwachstum mehr als kompensiert haben. Letzteres wiederum ist auf das Wachstum von Bevölkerung und Beschäftigten im DL-Sektor zurückzuführen, welche auch den Anstieg im Bereich Warmwasser verursacht hat. In der Summe von Raumwärme und Warmwasser ist die bei der Raumwärme festgestellte rückläufige Entwicklung in abgeschwächter Form immer noch sichtbar, d.h. unter dem Strich resultiert ein Rückgang, dies aufgrund der höheren energetischen Bedeutung der Raumwärme im Vergleich zum Warmwasser (siehe Abbildung 40).

Im Vergleich zur Periode 2000 bis 2020 schwächt sich die Entwicklung in der Folge leicht ab (auch unter Berücksichtigung des Umstands, dass die künftigen Betrachtungsperioden nur 15 und nicht 20 Jahre wie die vergangene umfassen). Trotz weiterem Wachstum der Beschäftigten im DL-Sektor und v.a. der Bevölkerung im Wohnsektor (was sich auch durch eine Zunahme des Nutzenergiebedarfs für Warmwasser ausdrückt) reduziert sich der Nutzenergiebedarf für Raumwärme um 5% bis 10% pro Betrachtungsperiode (siehe Tabelle 36). Auch die Summe von Raumwärme und Warmwasser ist in der Regel abnehmend, wenn auch in geringerem Mass (wegen des gegenläufigen Effekts beim Warmwasser).

Besonders ausgeprägt ist der Rückgang des Raumwärmebedarfs bei den EFH. Dies hat u.a. zu tun mit der grösseren Gebäudehüllfläche im Vergleich zur EBF und im Vergleich zu Volumen, so dass die Verbesserung der thermischen Verluste über die Gebäudehülle stärker ins Gewicht fallen (währendem der Luftwechsel im Verhältnis weniger stark ins Gewicht fällt).

Tabelle 36 Prozentuale Entwicklung der Nutzenergie für Raumwärme, Warmwasser und die Wärme insgesamt für verschiedene Gebäudesegment (Modelllauf 1: Referenz)

Bereich	Verwendungszweck	2020/2000	2035/2020	2050/2035
EFH	Raumwärme	-18%	-9%	-10%
	Warmwasser	28%	21%	8%
	Total RW+WW	-13%	-4%	-7%
MFH	Raumwärme	-13%	-5%	-9%
	Warmwasser	25%	16%	7%
	Total RW+WW	-7%	0%	-5%
Total WG	Raumwärme	-15%	-6%	-9%
	Warmwasser	28%	20%	7%
	Total RW+WW	-9%	-1%	-5%
DL-Sektor	Raumwärme	-5%	-6%	-7%
	Warmwasser	17%	6%	1%
	Total RW+WW	-3%	-4%	-6%
Total alle GT	Raumwärme	-12%	-6%	-8%
	Warmwasser	25%	17%	6%
	Total RW+WW	-7%	-2%	-5%

Quelle: Modellrechnungen mit dem GPM von TEP Energy, dieses Projekt

7.2.4 Entwicklung der Heizsysteme

Die Endenergie für Raumwärme nimmt etwas stärker ab als die zugrunde liegende Nutzenergie für Raumwärme (vgl. obenstehende Tabelle 36 mit der nachfolgenden Tabelle 37). Dies hat mit der Verbesserung der Wirkungs- bzw. Jahresnutzungsgrade der Heizsysteme zu tun. Verbesserungen betreffen zum einen die technische Ebene und zum anderen die strukturelle. Bei der ersteren geht es um die Verbesserung der Nutzungsgrade v.a. der feuerungstechnischen Anlagen (Öl, Gas, Holz) und bei der letzteren um den Umstieg von diesen Systemen auf effizientere Wärmepumpen (und Fernwärme). Pro memoria: weil bei den WP die gewonnene Umweltwärme ebenfalls als Endenergie bilanziert wird, ist der Gesamtnutzungsgrad bei den WP definitionsgemäss gleich 1, d.h. höher als bei den feuerungstechnischen Anlagen).

Stärker als die Endenergie insgesamt geht die Endenergienachfrage bei den reinen Heizsystemen Öl und Gas zurück, wie die weiteren in Tabelle 37 dargestellten Ergebnisse aufzeigen. Hervorzuheben sind folgende Befunde:

- Besonders gross ist der Unterschied zwischen dem Modelllauf 3 und dem Modelllauf 4, bei welchem eine Emissionsbeschränkung auf 6 kg CO₂/m² eingeführt wird.

- Die Aktualisierung der Berechnung der Heizleistung und die Aktualisierung der Kostenkennwerte hat einen vergleichsweise geringeren Einfluss. Am grössten ist bei der Aktualisierung der Kostenkennwerte (ML₃ vs. ML₂) beim Gas bei den EFH und bei Öl und Gas bei den DL-Gebäuden: bei den EFH nimmt Gas zwischen 2020 und 2050 weniger stark zu und bei den DL-Gebäuden nehmen die fossilen Energieträger weniger stark ab.
- Noch geringer ist der Einfluss auf die reinen Öl- und Gassysteme bei den Modellläufen 5 und 6; diese beeinflussen eher die Anteile und Verläufe der anderen Systeme, wie weiter unten aufgezeigt wird (Abbildung 41 sowie Tabelle 38 und Tabelle 39).

Tabelle 37 Prozentuale Entwicklung der Endenergie für Raumwärme (ohne WW) zwischen 2020 und 2050 für verschiedene Gebäudesegmente (Modellläufe 1 bis 6, Definition ML siehe Tabelle 34)

Bereich	Heizsystem	ML1	ML2	ML3	ML4	ML5	ML6
		Referenz	Neube- rechnung Leistung	Aktualisie- rung Kosten	Anforde- rung 6 kg CO ₂ /m ²	inkl. bivalente Systeme	Leise WP
EFH	Öl	-42%	-43%	-44%	-91%	-91%	-91%
	Gas	32%	32%	18%	-69%	-70%	-71%
	Total RW	-22%	-22%	-22%	-23%	-23%	-23%
MFH	Öl	-39%	-40%	-37%	-87%	-87%	-87%
	Gas	0%	1%	5%	-44%	-46%	-47%
	Total RW	-17%	-17%	-17%	-17%	-18%	-18%
Total WG	Öl	-40%	-41%	-39%	-87%	-88%	-88%
	Gas	8%	8%	9%	-47%	-49%	-50%
	Total RW	-19%	-19%	-19%	-20%	-20%	-20%
DL- Sektor	Öl	-45%	-47%	-29%	-85%	-85%	-85%
	Gas	-15%	-15%	-2%	-65%	-65%	-65%
	Total RW	-16%	-17%	-16%	-13%	-13%	-13%
Total alle GT	Öl	-41%	-43%	-34%	-86%	-87%	-87%
	Gas	-2%	-2%	4%	-55%	-56%	-57%
	Total RW	-18%	-18%	-17%	-17%	-13%	-14%

Quelle: Modellrechnungen mit dem GPM von TEP Energy, dieses Projekt

Auch aus Abbildung 41 wird deutlich, dass ein grosser Unterschied v.a. zwischen den Modellläufen 3 und 4 besteht. Die Einführung einer Beschränkung der Emissionen auf 6 kg CO₂/m² bewirkt, dass die erneuerbaren Systeme Holz (Schnitzel und Pellets summiert) und Wärmepumpen eine deutlich höhere energetische Bedeutung erlangen im Vergleich zu den Modellläufen 1 bis 3. Bemerkenswert ist hierbei das Verhältnis zwischen den Holzheiz- und den Wärmepumpensystemen; dieses ist 2050 beinahe ausgeglichen. Dies ist vor allem auf die

Relation der Investitionskosten bei den höheren Leistungsklassen (siehe Abbildung 47 im Anhang) zurückzuführen (die angenommenen Energiepreise (siehe Tabelle 11) würden eher für die WP sprechen).

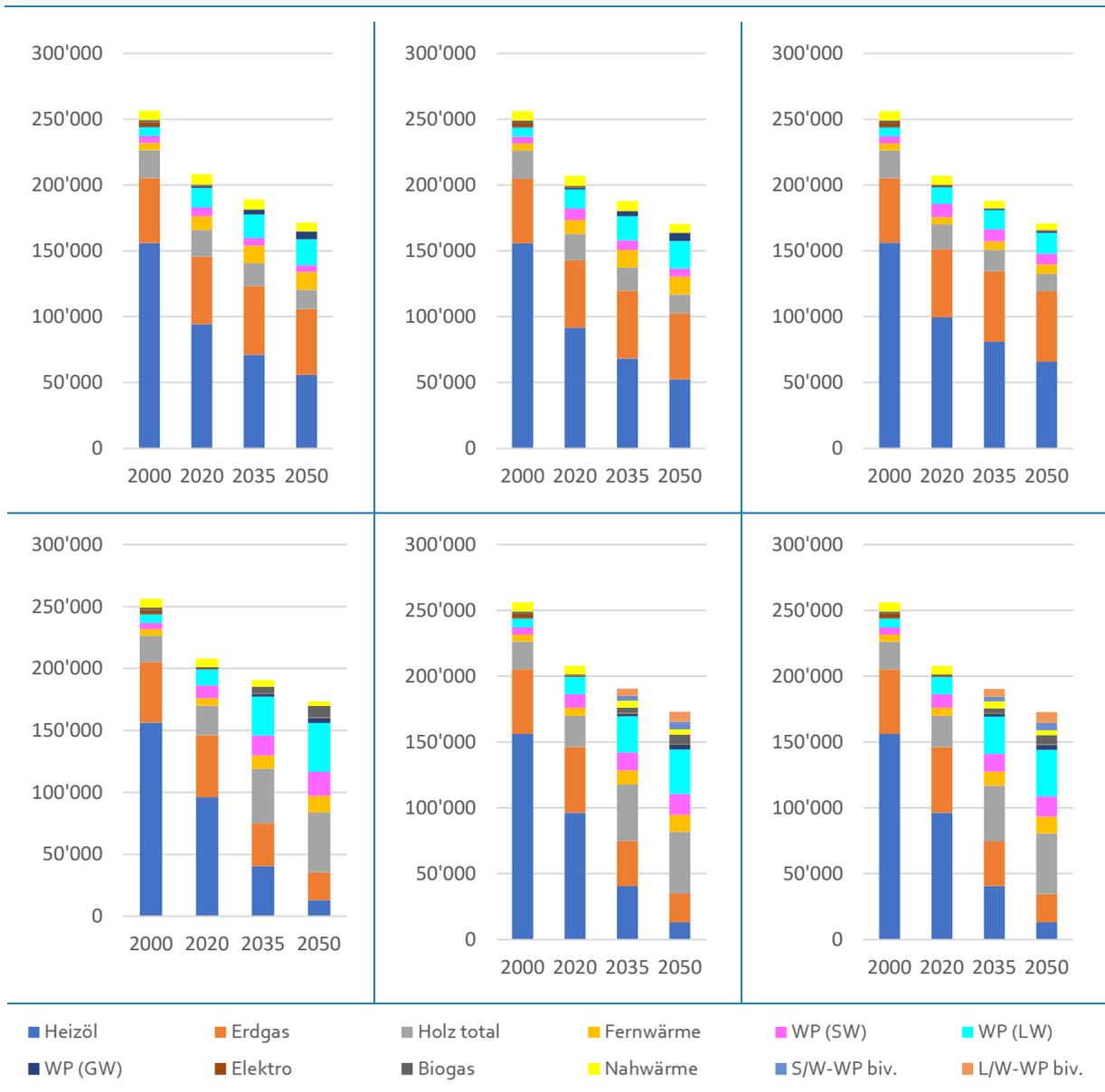


Abbildung 4.1: Entwicklung der Endenergienachfrage (TJ) für Raumwärme und Warmwasser aller Gebäudetypen pro Heizsystem für die Modellläufe 1 bis 6¹⁸ (Definition Modellläufe siehe Tabelle 34)

Zunehmend sind, wenn auch in geringerem Mass, die Systeme Fernwärme sowie Biogas. Dass Fernwärme nicht eine höhere Bedeutung erlangt, ist hier auf die angenommene räumliche Verfügbarkeit zurückzuführen; diese nimmt v.a. im Wohnbereich relativ wenig zu (siehe Tabelle 35) und deren Aufbaugeschwindigkeit ist relativ tief. Die Modellrechnungen für die Wärme-

¹⁸ Obere Zeile von links nach rechts: Modellläufe 1 bis 3, untere Zeile von links nach rechts Modellläufe 4 bis 6

initiative Schweiz (WIS) (Martin Jakob et al., 2020) und im Rahmen der Energieperspektiven (Kemmler et al., 2021) zeigen, dass bei erhöhter Verfügbarkeit (also unter der Annahme, dass solche Netze gebaut werden), die Rolle der Fernwärme zunimmt.

Aus dem Vergleich zwischen den Modellläufen 5 und 6 mit Modellauf 4 wird die Bedeutung der bivalenten Heizsysteme mit Gas (und Öl) kombiniert mit Wärmepumpen aufgezeigt. Diese erreichen bis 2050 einen Anteil von 9% bis 10% (siehe Tabelle 38 und Tabelle 39 für MFH in PJ bzw. in %, in Tabelle 46 und Tabelle 47 im Anhang für Wohngebäude insgesamt und für das Total aller Gebäudetypen). Solche bivalenten Systeme sind im EFH-Bereich eher etwas investitionskostenintensiver als bei den mittleren und vor allem bei den höheren Leistungsklassen (weil sie für den Spitzenlastkessel nur einen relativ geringen Energieanteil an fossilen bzw. biogenen Brennstoff haben, sind v.a. die Investitionskosten relevant).¹⁹

Anzumerken ist, dass die bivalenten Systeme die Anteile der monovalenten Öl- und Gassysteme kaum verändern, sondern dass sie ihre Anteile zulasten von Holz und Wärmepumpen gewinnen. Dies ist insofern nachvollziehbar, als dass monovalenten Öl- und Gassysteme die Anforderung von max. 6 kg CO₂/m² in der Regel nicht erfüllen bzw. nur bei sehr gut gedämmten Gebäuden, siehe (Heeren, Jakob, & Wallbaum, 2009) Dies bedeutet, dass bivalente Systeme im Kontext der CO₂-Anforderung vor allem einen ökonomischen Nutzen entfalten. In der Umsetzung kann dies durchaus von Belang sein, vor allem wenn entsprechende Anforderungen Ausnahmeklauseln aus wirtschaftlichen Gründen enthalten (wie es beim subsidiären Verbot von fossilen Energieträgern mutmasslich der Fall gewesen wäre) oder wenn sie sogar explizit Ausnahmen zulassen, wenn die Lebenszykluskosten bestimmte Mehrkosten überschreiten (wie im Fall des im Herbst 2021 vom kantonalzürcherischen Stimmvolk angenommenen Energiegesetzes).

Tabelle 38 Endenergie (PJ) für Raumwärme (ohne WW) für MFH die verschiedenen Heizsysteme zwischen 2020 und 2050 (Modellläufe 4 bis 6, Definition ML siehe Tabelle 34)

	ML3: Aktualisierung Kosten				ML4: Anforderung 6 kg CO ₂ /m ²				ML5: Inkl. bivalente LICs				ML6: Effekt leise WP			
	2000	2020	2035	2050	2000	2020	2035	2050	2000	2020	2035	2050	2000	2020	2035	2050
Heizöl	56.7	37.4	29.8	23.7	56.7	35.9	15.2	4.8	56.7	36.0	15.3	4.7	56.7	36.0	15.3	4.7
Erdgas	15.8	18.0	19.1	19.0	15.8	17.5	13.3	9.8	15.8	17.5	13.0	9.5	15.8	17.5	12.9	9.2
Holz total	3.5	5.1	4.7	3.9	3.5	7.3	13.1	13.7	3.5	7.3	12.8	13.1	3.5	7.3	12.4	12.7
Fernwärme	1.8	2.2	2.5	2.6	1.8	2.3	3.8	4.3	1.8	2.3	3.7	4.2	1.8	2.3	3.7	4.2
WP (SW)	1.1	0.7	0.7	0.7	1.1	0.7	3.1	4.5	1.1	0.7	2.3	3.4	1.1	0.7	2.2	3.2
WP (LW)	1.6	1.0	2.3	3.4	1.6	1.0	9.2	13.3	1.6	1.0	7.4	10.9	1.6	1.0	7.9	11.6
WP (GW)	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.5	0.8	0.1	0.1	0.4	0.7	0.1	0.1	0.4	0.7
Elektro	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
Biogas	0.4	0.2	0.1	0.1	0.4	0.2	2.0	3.4	0.4	0.2	1.5	2.7	0.4	0.2	1.4	2.5
Nahwärme	2.6	2.5	2.2	1.9	2.6	2.6	2.0	1.4	2.6	2.5	2.0	1.4	2.6	2.5	2.0	1.4
Solar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S/W-WP biv.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.3	2.0	-	-	1.2	1.9
L/W-WP biv.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.3	3.3	-	-	2.5	3.6
Total	83.6	67.2	61.6	55.6	83.6	67.7	62.2	56.0	83.6	67.7	62.2	55.8	83.6	67.7	62.1	55.7

¹⁹ Dass bivalente Lösungen auch im EFH-Bereich einen nicht vernachlässigbaren Anteil aufweisen, obwohl sie im Mittel in diesem Bereich eher kostenintensiver sind, hat u.a. mit dem Modellierungsansatz zu tun: teilweise treffen im Entscheidungsmodul des GPM Konstellationen von (kosten)günstigen Fällen bei den einen Systemen auf aufwändige Konstellationen bei anderen Systemen aufeinander. Da bivalente Systeme in günstigen Fällen kostenintensiver sind als monovalente in aufwändigen Konstellationen, werden im Modell eher erstere gewählt (und bei vergleichbaren Kosten verteilen sich die Marktanteile bei Neubau und Heizungsersatz auf die verschiedenen Systeme).

Mit dem ML 6 im Vergleich zum ML 5 wird der Effekt von leiseren Luft/Wasser-WP aufgezeigt. Diese bewirken vor allem bei MFH und bei DL-Gebäuden eine gewisse Wirkung, auch wenn diese als gering zu bezeichnen ist (ca. 1 Prozentpunkt). Dies ist mit den in Kap. 7.1 dargestellten Ergebnissen der GIS-gestützten Abstandsanalysen konsistent: zwischen den Varianten 2 und 3, welche den ML 5 bzw. 6 zugrunde liegen, sind die Unterschiede gering; entweder sind WP auch bei «normalen» Lärmemissionen möglich oder sie sind es auch bei leisen nicht (grösser ist der Unterschied zur Variante 1 mit höheren Lärmschutzanforderungen, die zu deutlichen Potenzialeinschränkungen führt; der Nutzen von leisen WP wurde allerdings nicht untersucht).

Tabelle 39 Endenergieanteile (%) für Raumwärme (ohne WW) für die verschiedenen Heizsysteme zwischen 2020 und 2050 (Modellläufe 1 bis 6, Definition ML siehe Tabelle 34)

	ML3: Aktualisierung Kosten				ML4: Anforderung 6 kg CO ₂ /m ²				ML5: Inkl. bivalente LICS				ML6: Effekt leise WP			
	2000	2020	2035	2050	2000	2020	2035	2050	2000	2020	2035	2050	2000	2020	2035	2050
Heizöl	68%	56%	48%	43%	68%	53%	24%	8%	68%	53%	25%	8%	68%	53%	25%	8%
Erdgas	19%	27%	31%	34%	19%	26%	21%	18%	19%	26%	21%	17%	19%	26%	21%	17%
Holz total	4%	8%	8%	7%	4%	11%	21%	25%	4%	11%	21%	23%	4%	11%	20%	23%
Fernwärme	2%	3%	4%	5%	2%	3%	6%	8%	2%	3%	6%	7%	2%	3%	6%	7%
WP (SW)	1%	1%	1%	1%	1%	1%	5%	8%	1%	1%	4%	6%	1%	1%	4%	6%
WP (LW)	2%	1%	4%	6%	2%	1%	15%	24%	2%	1%	12%	20%	2%	1%	13%	21%
WP (GW)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	0%	0%	1%	1%	0%	0%	1%	1%
Elektro	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biogas	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%	6%	0%	0%	2%	5%	0%	0%	2%	5%
Nahwärme	3%	4%	4%	3%	3%	4%	3%	2%	3%	4%	3%	3%	3%	4%	3%	3%
S/W-WP biv.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2%	4%	-	-	2%	3%
L/W-WP biv.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4%	6%	-	-	4%	6%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Quelle: Modellrechnungen mit dem GPM von TEP Energy, dieses Projekt

7.2.5 Entwicklung auf Ebene Endenergie

Werden die Ergebnisse auf Ebene Energieträger und für Raumwärme und Warmwasser im Total betrachtet (Tabelle 40), gibt es im Vergleich zur Betrachtung auf Ebene Heizsysteme (Tabelle 37). Bis und mit ML 3 nimmt Erdgas weniger zu bzw. bei den ML 5 bis 6 weniger stark ab (v.a. bei den EFH).

Vor allem beim Energieträger Erdgas zeigt sich, dass allein die Anforderung von max. 6 kg CO₂/m² für eine vollständige Dekarbonisierung des Gebäudesektors nicht ausreichend wäre; im Vergleich zum Stand 2020 beträgt die Reduktion nur rund 55%, wobei es grosse Unterschiede zwischen den Gebäudetypen gibt (-65% bis -70% bei den EFH und den DL-Gebäuden, jedoch «nur» -45% bei den MFH). Auch beim Öl beträgt die Reduktion über alle Gebäudetypen «nur» rund -85% (2050 im Vergleich zu 2020) bzw. -92% (im Vergleich zu 2000).

Tabelle 40 Prozentuale Entwicklung der Endenergie der fossilen Energieträger Öl und Gas sowie für das Total von Raumwärme und WW zwischen 2020 und 2050 für verschiedene Gebäudesegmente (Modellläufe 1 bis 6, Definition ML siehe Tabelle 34)

Bereich	Heizsystem	ML1	ML2	ML3	ML4	ML5	ML6
		Referenz	Neube- rechnung Leistung	Aktuali- sierung Kosten	Anforde- rung 6 kg CO ₂ /m ²	inkl. bivalente Systeme	Leise WP
EFH	Öl	-43%	-45%	-45%	-90%	-89%	-89%
	Gas	16%	15%	6%	-69%	-64%	-64%
	Total RW+WW	-16%	-16%	-16%	-18%	-18%	-19%
MFH	Öl	-43%	-44%	-41%	-87%	-86%	-86%
	Gas	-5%	-5%	-2%	-46%	-45%	-46%
	Total RW+WW	-13%	-13%	-13%	-14%	-15%	-15%
Total WG	Öl	-43%	-44%	-41%	-87%	-86%	-86%
	Gas	1%	1%	1%	-48%	-46%	-47%
	Total RW+WW	-14%	-14%	-14%	-15%	-15%	-16%
DL-Sektor	Öl	-49%	-51%	-34%	-86%	-85%	-85%
	Gas	-19%	-19%	-8%	-65%	-62%	-62%
	Total RW+WW	-17%	-17%	-16%	-14%	-14%	-14%
Total alle GT	Öl	-44%	-46%	-38%	-86%	-86%	-86%
	Gas	-7%	-7%	-3%	-55%	-52%	-53%
	Total RW+WW	-14%	-14%	-14%	-14%	-15%	-15%

Quelle: Modellrechnungen mit dem GPM von TEP Energy, dieses Projekt

Im Total aller Energieträger ist auf Ebene Endenergie ein Rückgang von 13% bis 17% zu verzeichnen, je nach Modelllauf und Gebäudetyp (Abbildung 42). Dem deutlichen Rückgang bei den fossilen Energieträgern Öl und Gas (siehe auch Tabelle 40) steht ein Anstieg der erneuerbaren Energieträger Biogas, Holz, Solar, Umweltwärme und Strom gegenüber. Bzgl. der verschiedenen erneuerbaren Energieträger ist ebenfalls ein deutlicher Unterschied zwischen den ML 1 bis 3 und 4 bis 6 festzustellen; bei letzteren ist der Anstieg sichtbar deutlicher ausgeprägt (Abbildung 42). Für die Modellläufe 4 bis 6 kann im Einzelnen folgendes festgehalten werden:

- Die mittels WP direkt bei den Gebäuden gewonnene Umweltwärme aus Luft, Geothermie und Grundwasser nimmt deutlich zu von rund 20 PJ im Jahr 2020 auf rund 60 PJ im Jahr 2050 (in den ML 4 bis 6).²⁰
- Der mit den WP verbundene Strombedarf steigt ebenfalls an, allerdings nicht so stark, weil davon ausgegangen wird, dass sich die strombezogenen JNG bei den WP weiter verbessern werden (siehe «Technischer Bericht» der EP 2050+ und darin zitierte Grundlagen). Zudem wird der zusätzliche WP-Strom zu einem grossen Teil durch den Rückgang des Stromverbrauchs von Elektroheizungen und Elektroboilern kompensiert, so dass der Stromverbrauch für Wärmezwecke (ohne Hilfsenergie und Antriebe für Lüftungsanlagen) nur rund 50% steigt (von knapp 20 PJ auf knapp 30 PJ).²⁰
- Wie bei der Umweltwärme resultiert auch beim Holz ein deutlicher Anstieg von rund 30 PJ im Jahr 2020 auf knapp 60 PJ im Jahr 2050.²⁰ Zum Vergleich: gemäss Gesamtenergiestatistik (GEST) wurden in den drei Nachfragesektoren Haushalte, Dienstleistungen, Landwirtschaft und Industrie im Jahr 2020 rund 39 PJ verbraucht, wobei darin auch der Verbrauch in Industrieprozessen enthalten ist.²¹
- In ähnlichen Grössenordnungen liegen die relativen Zunahmen zwischen 2020 und 2050 bei den Energieträgern Solarthermie (von 9 PJ auf 13 bis 15 PJ) und Fernwärme (von 9 bis 13 PJ auf 13 bis 16 PJ).
- Biogas verbleibt gemäss den Modellrechnungen bei etwa 15 PJ, was u.a. mit dem relativ hohen Energiepreis von Biogas von 17 Rp/kWh zu tun hat (zum Vergleich: für WP-Strom wird von 23 Rp/kWh ausgegangen, was marginalen Wärmekosten von 8 Rp/kWh oder weniger entspricht).

²⁰ Darin nicht bilanziert sind entsprechende Werte bei der Erzeugung der Fernwärme.

²¹ Im Jahr 2017 war es ungefähr gleich viel; bezogen auf den Wert von 2017 (5 Mio. m³) geht die Holzenergiebranche von einem nutzbaren Potential aus einheimischer Produktion von 7.5 bis 8 Mio. m³ aus, was einer Steigerung von rund 50% bzw. einem Wert von rund 60 PJ entspricht. Die für 2050 berechnete Holzenergiemenge liesse sich also knapp mit dem einheimischen Potenzial decken.

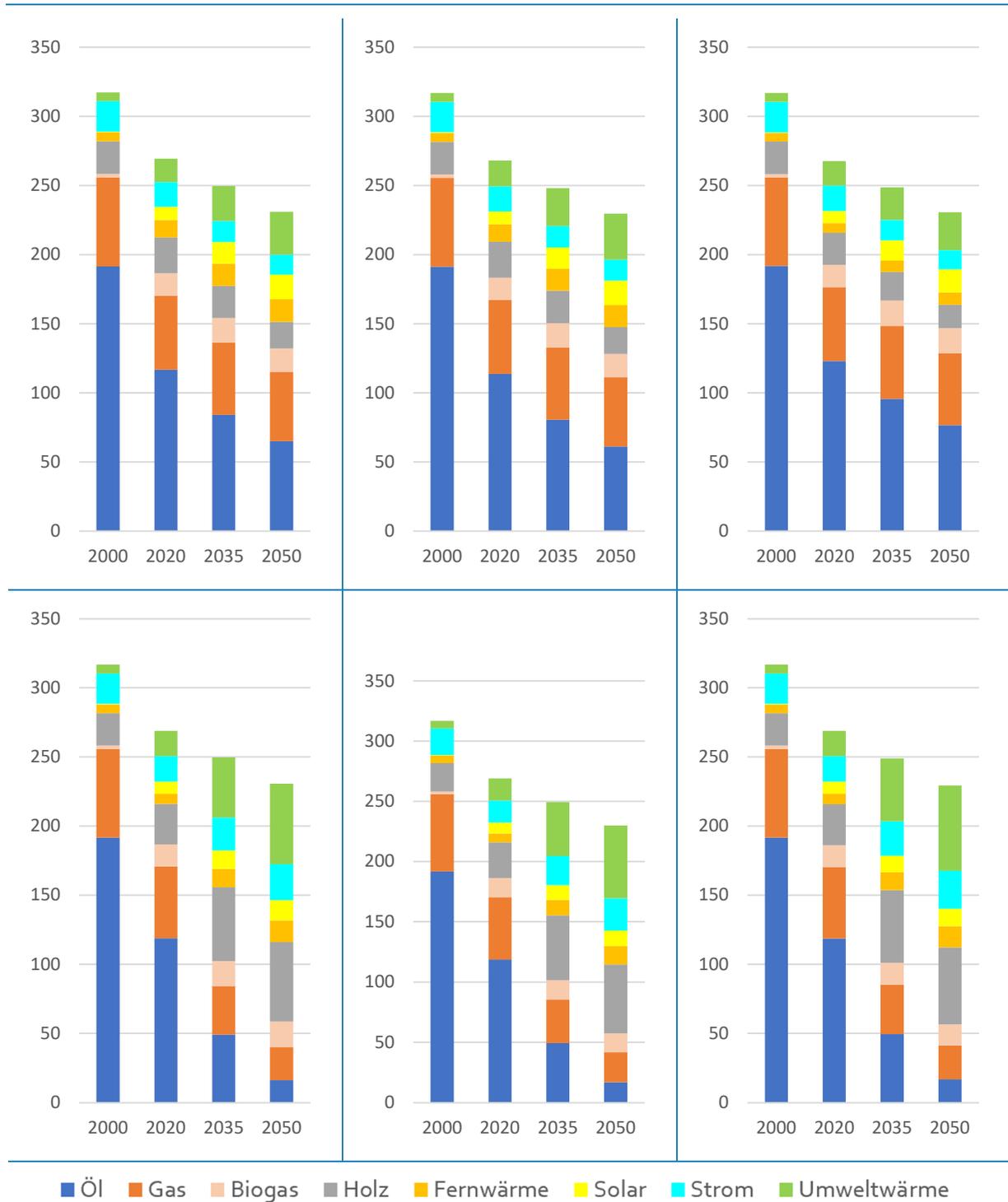


Abbildung 42: Entwicklung des Endenergiebedarfs (PJ) aller Gebäudetypen aus der Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser Modellläufe 1 bis 6 (Definition Modellläufe siehe Tabelle 34, Reihenfolge der Darstellung gemäss Fussnote¹⁸)

7.2.6 Entwicklung der direkten CO₂-Emissionen

Die direkten CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von Erdöl und Erdgas entwickeln sich relativ wie die entsprechenden Endenergieverbräuche (siehe Tabelle 40). Gewichtet mit ihren Verbräuchen ergeben sich die Emissionen im Total bzw. deren relative Entwicklung. Zwischen 2020 und 2050 gehen die Emissionen bei den Modellläufen 1 bis 3 je nach Gebäudesegment um rund 30% bis 40% zurück (siehe Tabelle 41). Dies ergibt sich gemäss den Modellrechnungen mit dem GPM, wenn die Gebäudeeigentümer diejenigen Massnahmen umsetzen, die gemäss den hinterlegten Kosten (siehe Abbildung 48 für die Modellläufe 1 und 2 sowie Abbildung 47 mit den neuen Kostenkennwerten 3 bis 6) und den unterstellten Energiepreisen (Tabelle 11) wirtschaftlich sind. Mit den neuen Kostenkennwerten ist die Reduktion der direkten CO₂-Emissionen bei den EFH etwas grösser (insbesondere, weil bei den alten Kostenkennwerten die Instandsetzung für Öl und Gasheizungen relativ hoch sind) und bei den Gebäuden des DL-Sektors deutlich geringer (-27% statt -42%).

Mit der Einführung einer Beschränkung der CO₂-Emissionen im ML₄ auf 6 kg CO₂/m² erhöht sich die prozentuale Reduktion auf zwischen -77% bei den MFH und -86% bei den EFH. Im Total über alle Gebäudetypen beträgt die Reduktion -78%. Mit der Einführung der bivalenten Lösungen im ML₅, bei denen ein gewisser fossiler Anteil mit enthalten ist, reduziert sich die Reduktion um 1 bis 3 Prozentpunkte. Leisere Wärmepumpen (ML₆) zeitigen keinen zusätzlichen Effekt bzw. nur innerhalb des Rundungsbereichs der Ergebniswerte.

Als Zwischenfazit lässt sich festhalten, dass mit einer Beschränkung der CO₂-Emissionen von 6 kg CO₂/m² eine hohe Reduktionswirkung ausgelöst wird, was im Quervergleich mit anderen Studien, die breiter gefächerte Massnahmen thematisieren, doch ein bemerkenswertes Ergebnis ist. Jedoch ist auch anzumerken, dass damit eine vollständige Dekarbonisierung nicht erreicht wird. Dafür bräuchte es weitere Massnahmen wie beispielsweise ein Verbot des Einbaus von fossilen Anlagen (mit Verweis auf deren Lebensdauer bereits ab 2025, spätestens ab 2030), die Förderung von biogenen oder erneuerbaren Gasen und/oder von Wärmepumpen, um die restlichen Emissionen zu reduzieren. Eine entsprechende Förderung kann u.U. gezielt erfolgen, indem speziell wirtschaftliche Härtefälle adressiert werden.

Tabelle 41 Prozentuale Entwicklung der direkten CO₂-Emissionen (Raumwärme und WW) zwischen 2020 und 2050 für verschiedene Gebäudesegmente (Modellläufe 1 bis 6)

Bereich	ML1	ML2	ML3	ML4	ML5	ML6
	Referenz	Neube- rechnung Leistung	Aktuali- sierung Kosten	Anforde- rung 6 kg CO ₂ /m ²	inkl. bivalente Systeme	Leise WP
EFH	-31%	-31%	-34%	-86%	-83%	-83%
MFH	-33%	-34%	-31%	-77%	-76%	-76%
Total Wohngebäude	-32%	-33%	-32%	-78%	-77%	-77%
DL-Sektor	-41%	-42%	-27%	-80%	-79%	-79%
Total alle Gebäudetypen	-35%	-36%	-29%	-78%	-77%	-78%

Quelle: Modellrechnungen mit dem GPM von TEP Energy, dieses Projekt

In Abbildung 43 ist die Entwicklung der direkten Emissionen auch grafisch ab 2000 und mit einem Ausblick bis 2060 dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass die Emissionen nach 2050 weiter sinken und beispielsweise im ML 6 auf 2 Mio. t CO₂ pro Jahr, was ca. 200 kg pro Kopf der Bevölkerung entspricht.

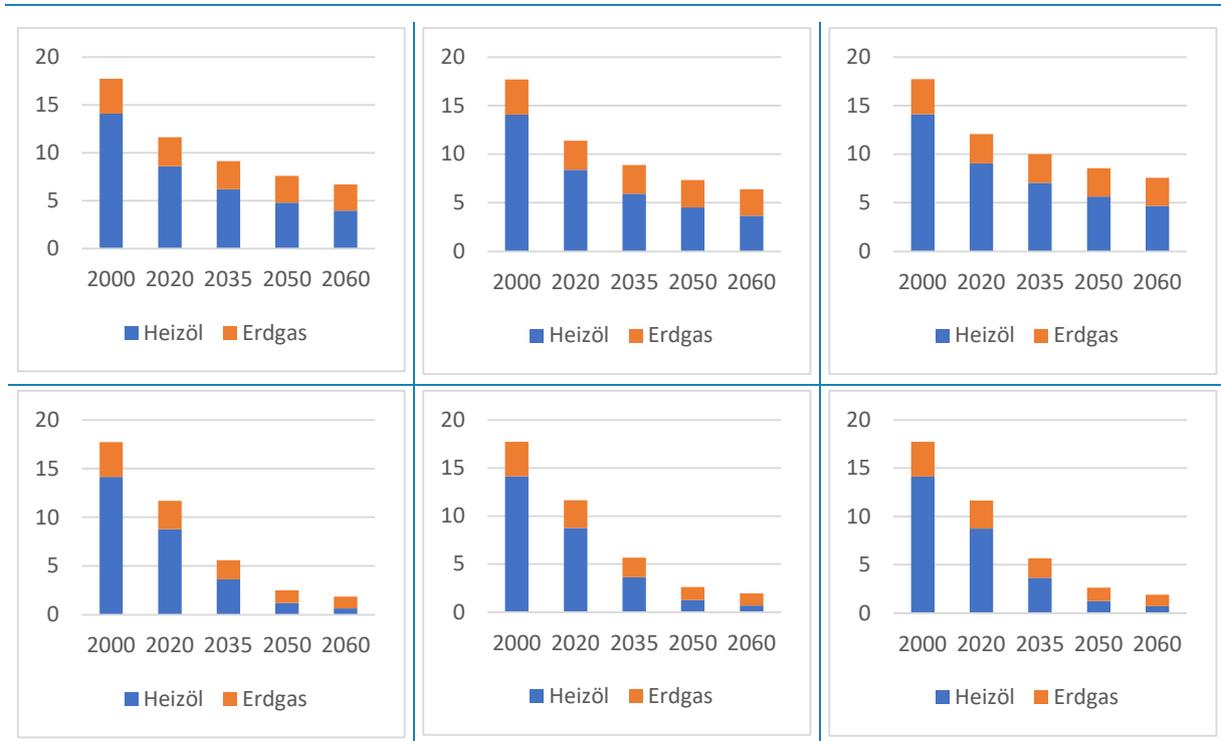


Abbildung 43: Entwicklung der energiebedingten direkten CO₂-Emissionen (Mio. t / Jahr) aller Gebäudetypen aus der Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser Modellläufe 1 bis 6 (Definition Modellläufe siehe Tabelle 34, Reihenfolge der Darstellung gemäss Fussnote¹⁸)

7.2.7 Entwicklung der THG-Emissionen

Die gesamten THG-Emissionen aus der Wärmebereitstellung von Raumwärme und Warmwasser, welche auch die vorgelagerten Ketten gemäss Life Cycle Assessment (LCA) beinhalten, betragen im Jahr 2000 gemäss Modellrechnungen rund 23 Mt CO₂-äqu. Hierbei sind die Emissionsfaktoren gemäss KBOB 2009:2022 zugrunde gelegt. Nicht enthalten in diesen Werten sind die sog. «Grauen Emissionen» aus der Erstellung der Gebäude und von Massnahmen der Gebäudeerneuerungen.

In den Modellläufen ML₁ bis ML₃ sinken die gesamten THG-Emissionen um rund die Hälfte, bei den ML₄ bis ML₆ um rund drei Viertel, siehe Abbildung 44. Diese Entwicklung ist vor allem auf den Rückgang der Emissionen der Energieträger Öl- und Gas zurückzuführen. Die Emissionen der übrigen Energieträger haben im Jahr 2000 anteilmässig eine vergleichsweise geringe Bedeutung.

Deren relative Relevanz nimmt bis 2050 allerdings deutlich zu, vor allem in den drei Szenarioläufen mit der Anforderung max. 6 kg CO₂-Emissionen pro m² (ML 4 bis 6), bei denen deren Anteil auf über 50% steigt.



Abbildung 44: Entwicklung der energiebedingten gesamten CO₂-Emissionen (in Mio. t/Jahr) aller Gebäudetypen aus der Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser Modellläufe 1 bis 6 (Definition Modellläufe siehe Tabelle 34, Reihenfolge der Darstellung gemäss Fussnote¹⁸)

7.2.8 Entwicklung der Investitionskosten

Die Investitionskosten werden für die Jahre 2025 und 2050 ausgewertet, was u.a. modelltechnisch zu begründen ist. Zum einen wird damit die Periode zwischen dem Modellstartjahr 2000 und dem Ende der Betrachtungsperiode 2050 gleichmässig unterteilt und zum anderen sind die Ergebnisse nach einer Periode von 25 Jahren, was in etwa einem Re-Investitionszyklus bei den Heizanlagen entspricht, aussagekräftiger als zu Beginn der Betrachtungsperiode.

Gemäss den GPM Berechnungen hat der Markt an jährlichen Neu-, Erneuerungs- und Instandsetzungsinvestitionen im Bereich Heizanlagen ein Volumen von knapp drei Mia. CHF pro Jahr. Die Heizanlagen in Neubauten spielen dabei eine untergeordnete Rolle, deren Bedeutung zudem abnimmt, zum einen, weil die Neubautätigkeit insgesamt bis 2050 einem abnehmenden Trend folgt (siehe auch EP 2050+ des Bundes) und zum anderen, weil die Anlagen in neuen Gebäuden aufgrund ihrer Effizienz geringer dimensioniert werden können.

In den Modellläufen 1 bis 3 nehmen die Instandsetzungsinvestitionen den grössten Anteil ein (Abbildung 45). Mit der Einführung einer Anforderung von max. 6 kg CO₂ pro m² ab ML₄ nehmen die Investitionen in Substitutionen von fossil zu erneuerbar (in Abbildung 45 als «Substitution 1» bezeichnet) deutlich zu.²² Dass sie gegen Ende der Betrachtungsperiode wieder abnehmen, bedeutet, dass der Transformation Prozess zu einem grossen Teil abgeschlossen ist; bei den meisten Instandsetzungen handelt es sich dabei um solche von erneuerbaren Systemen (inkl. WP).

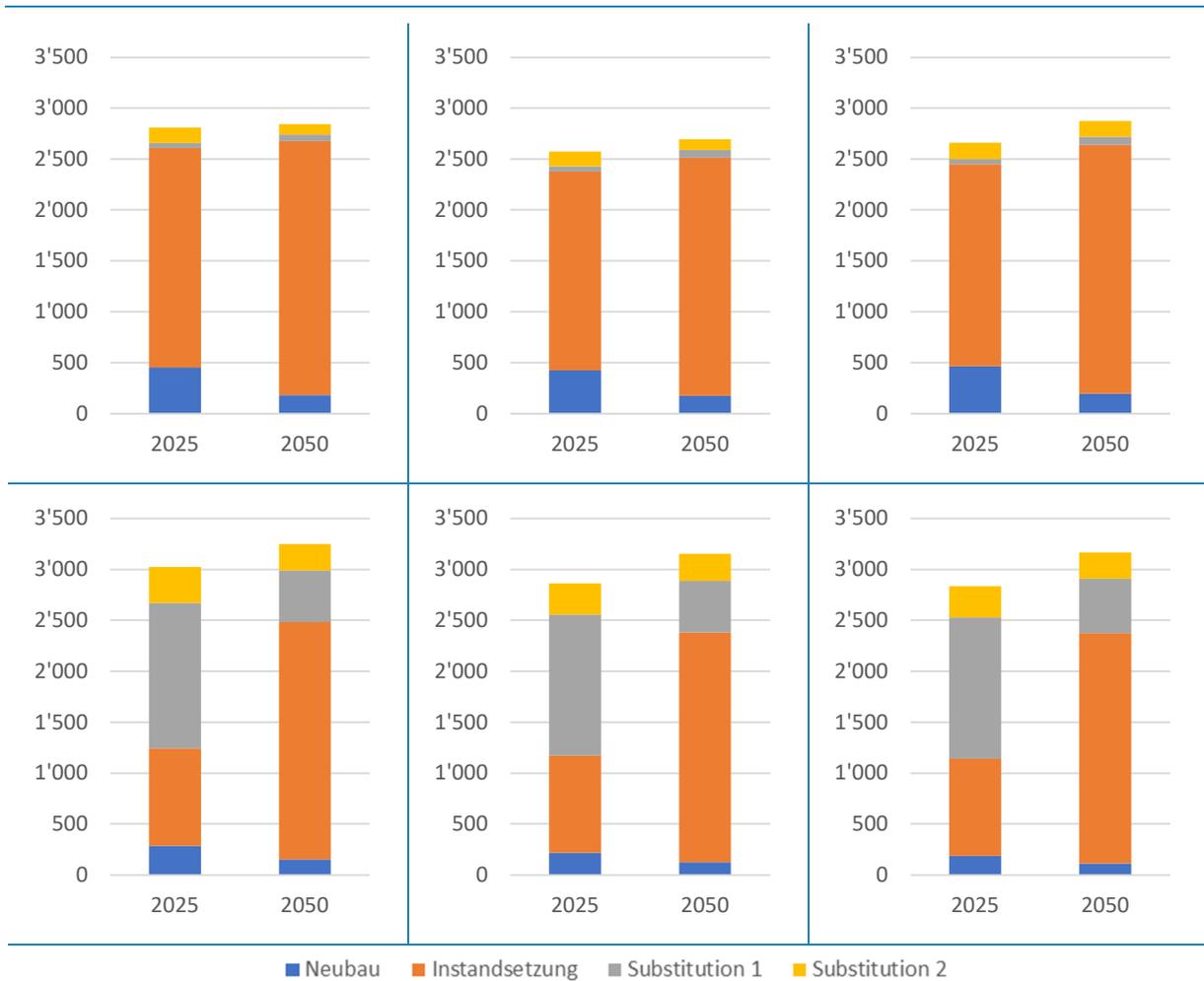


Abbildung 45: Investitionskosten (Mio. CHF / Jahr) in Heizsysteme für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser für alle Gebäudetypen, Modellläufe 1 bis 6 (Definition Modellläufe siehe Tabelle 34, Reihenfolge der Darstellung gemäss Fussnote¹⁸)

Mit der Anforderung von max. 6 kg CO₂/m² nimmt das Investitionsvolumen insgesamt leicht zu: zwischen Modellauf 3 und ML 4 sind es zwischen gut 10% und knapp 15%. Ein Teil dieser Zunahme kann kompensiert werden, indem zielgerichteter dimensioniert wird (siehe Unter-

²² Mit Substitution 2 werden andere Substitutionen bezeichnet, z.B. von Öl zu Gas, von fossil zu Fernwärme und von erneuerbar zu erneuerbar (z.B. WP zu Holz oder umgekehrt).

schied zw. Modellauf 1 und 2) und indem bivalente Systeme eingesetzt werden (siehe Unterschied zw. Modellauf 4 und 5). Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht erscheint damit eine Dekarbonisierung des Gebäudesektors eine finanzierbare Dimension einzunehmen, selbst ohne Berücksichtigung der eingesparten Energiekosten.

Die Auswertungen der Ergebnisse zeigen zudem, dass der grösste Teil des Investitionsvolumens auf den Bereich EFH fällt; sie machen einen Anteil von 40% bis 50% aus. Dies ist zum einen auf ihren grossen Flächenanteil und zum anderen auf die wesentlich höheren spezifischen Kosten (CHF/m²) zurückzuführen.

7.2.9 Jährliche Energiekosten

Um ein Gesamtbild zu erhalten, sind nebst den Investitionskosten und den Betriebs- und Unterhaltskosten auch die jährlichen Energiekosten von Interesse. Diese ergeben sich aus den Endenergieverbräuchen (siehe Abbildung 42) und Annahmen zu Endenergiepreisen für die verschiedenen Jahre (Annahmen für drei Stützjahre siehe Tabelle 42). Die Preise der fossilen Energieträger steigen um 20% bis 30% an (begründet auch durch die steigende CO₂-Abgabe) und auch das Preisniveau von Strom und Holz steigt an (kosten- und marktbedingt). Bei der Fernwärme wird der Preis durch verschiedene Faktoren beeinflusst, u.a. durch die Strompreise im Fall des Einsatzes von Wärmepumpen (hier sind entsprechend das Grosshandelspreise anzusetzen), durch Skaleneffekte bei Erzeugung und Verteilung (Erhöhung des Anschlussgrades) sowie durch Förderbeiträge.

Tabelle 42 Annahmen zur Entwicklung der Endenergiepreise (CHF/kWh) von 2020 bis 2050

	2020	2035	2050
Heizöl	0.096	0.119	0.133
Erdgas	0.101	0.116	0.124
Biogas	0.240	0.231	0.223
Strom	0.213	0.232	0.304
Holz	0.074	0.095	0.118
Fernwärme	0.068	0.091	0.074

Quelle: Annahmen TEP Energy, dieses Projekt

In Anwendung der Annahmen zu den Energiepreisen (Tabelle 42) belaufen sich die jährlichen Energiekosten für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser auf rund 7 bis 8 Mia. CHF pro Jahr (Abbildung 46). Dies ist deutlich mehr als die jährlichen Investitionen in Heiz- und Warmwasseranlagen, die rund 3 Mia. CHF pro Jahr betragen (siehe Abbildung 45).

Auch wenn die Energiepreise im Niveau recht unterschiedlich sind, reflektieren die Unterschiede zwischen den Modellläufen bis zu einem gewissen Mass die Unterschiede bei der Endenergienachfrage (siehe Abbildung 42). Wie bei dieser sind die Energiekosten beim Modellauf 3 am höchsten, begründet durch den höheren Anteil an fossilen Energieträgern (bedingt durch die relativ höheren Kosten der erneuerbaren Heizsysteme aufgrund der Aktualisierung der Kostendaten im LICS-Projekt). In den Modellläufen 4 bis 6 ist eine Verlage-

zung der Kosten hin zu Strom (für dezentrale WP) und Holz zu verzeichnen; das Kostenniveau ist in diesen Modellläufen einige hundert Mio. CHF/Jahr tiefer als in den ersten drei Modellläufen. In der Summe werden damit die höheren Investitionskosten in etwa durch die geringeren Energiekosten kompensiert.



Abbildung 46: Jährliche Energiekosten (Mio. CHF / Jahr) in Heizsysteme für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser für alle Gebäudetypen, Modellläufe 1 bis 6 (Definition Modellläufe siehe Tabelle 34, Reihenfolge der Darstellung gemäss Fussnote¹⁸)

7.3 Fazit der Betrachtung auf Gebäudeparkebene

Mit der Betrachtung auf Ebene des Gebäudeparks kann die Rolle der LICs-Lösungen, die aus der Perspektive des Einzelgebäudes entwickelt und auf konkrete Fallstudien angewendet wurden, in den Gesamtkontext gestellt werden. Mit den GIS-gestützten Analysen können die Potenziale der verschiedenen erneuerbaren Energiequellen berechnet und spezifische Einschränkungen bzgl. ihrer Nutzung im gesamtschweizerischen Kontext quantifiziert werden.

Mit der Gebäudeparkmodellierung können die entwickelten LICs-Lösungen in den Gesamtkontext gestellt und weitere LICs-Lösungen identifiziert werden. Mittels Auswertung verschiedener Ergebnisindikatoren können die Zielbeiträge und Folgen der LICs-Lösungen aufgezeigt werden.

8 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

8.1 Schlussfolgerungen

Im Rahmen des LICS-Projekts wurde gezielt nach Konzepten, Möglichkeiten und Potenzialen von Low Invest Cost Sanierungen gesucht und auf verschiedenen Ebenen untersucht. Um deren Umsetzungspotenzial und die möglichen Zielbeiträge zu einer Dekarbonisierung des Gebäudeparks realistisch aufzuzeigen, ist es wichtig, die verschiedenen Ebenen vom konkreten Bauteil über das spezifische Gebäude und den Gebäudekontext bis hin zum Gebäudepark auf eine abgestimmte Weise zu verknüpfen. Im LICS-Projekt wurde dieser Ansatz verfolgt und entsprechend können die nachfolgend formulierten Ergebnisse und Schlussfolgerungen als robust bezeichnet werden.

- Aus den Ergebnissen zu den konzeptionellen Entwicklungen von LICS-Lösungen und den Arbeiten aus der Einzelgebäudeperspektive (generisch und fallstudienpezifisch) lässt sich ableiten:
 - LICS-Lösungen in Form von bivalenten Systemen stellen eine interessante Möglichkeit dar, einen grossen Schritt in Richtung erneuerbar und fossilarm betriebene Gebäude zu tun. Auch wenn als Nachteil zu nennen ist, dass noch gewisse Restemissionen übrigbleiben (auch wenn fossile Energie für die Spitzenlastdeckung eingesetzt werden, sind es i.d.R. weniger als 6 kg CO₂ pro m² EBF), sind solche LICS-Lösungen mit folgenden hauptsächlich Vorteilen verbunden:
 - Konkrete technische Hemmnisse, die dezentrale erneuerbare Systeme einschränken, können in gewissen Fällen bzw. im urbanen Kontext häufig dank bivalenten LICS-Lösungen überwunden werden. Solche Systeme sind vergleichsweise leiser, deren Gesamteffizienz ist weniger von ungünstigen Gebäudekonstellationen beeinträchtigt und sie lassen sich somit besser in bestehende, nicht oder nur teilweise sanierte Gebäude einbinden.
 - Überschaubare Investitionskosten (diese liegen in der Regel zwischen den fossilen Systemen und komplett erneuerbaren Alternativen und betragen gut 200 bis 300 CHF/m²).
 - Weil nur relativ wenig Energie für die Spitzenlast erforderlich ist, können zu deren Deckung auch erneuerbar erzeugte Gase oder Brennstoffe eingesetzt werden, auch wenn diese pro kWh mit höheren Kosten verbunden sind. Damit kann mit bivalenten Lösungen eine weitergehende Dekarbonisierung erreicht werden.
 - Unterstützende bzw. vorbereitende LICS-Lösungen in Form von moderater Bedarfsreduktion im Bereich Gebäudehülle, Heiz- und Warmwasserverteilung, punktuell bei der Wärmeabgabe, Senkung der Vorlauftemperaturen, sorgfältige Dimensionierung und Inbetriebnahme, geeignete Produktwahl, Reduktion des thermisch wirksamen Luftwechsels durch diverse Massnahmen, Überprüfen und Anpassen von Betriebsparametern u.w.m. dienen sowohl den bivalenten als auch den monovalenten Lösungen, v.a. wenn sie auf Wärmepumpen beruhen.

- Aufgrund der Ergebnisse aus den Kostenerhebungen können aus Einzelgebäudeperspektive auch folgende monovalente Lösungen als LICS bezeichnet werden: Anschluss an thermische Netze (sofern die Anschlusskosten in überschaubarem Rahmen gehalten werden) und geeignete Holzheizungen aller Art sofern dies Platzverhältnisse und lufthygienische Anforderungen zulassen). Dabei kommen Pelletsheizungen eher bei im unteren, Schnitzelheizungen eher im oberen Leistungsbereich zum Einsatz.
- Der Vollständigkeit halber ist zu erwähnen, dass komplette Gebäude(hüllen)sanierungen in der Regel weder als LICS noch als ausreichende Emissionsminderungsmaßnahmen bezeichnet werden können, solange solche Gebäude weiterhin fossil betrieben werden. In solchen Fällen bleiben die Emissionen i.d.R. deutlich über 6 kg CO₂ pro m² EBF.
- Aus den Ergebnissen der Arbeiten aus der Gebäudeparkperspektive lässt sich ableiten:
 - Nebst den bivalenten LICS-Lösungen, die sich bei den Einzelgebäuden als zielführend erwiesen haben, spielen gemäss den Ergebnissen der Gebäudeparkmodellierung weitere System eine grosse Rolle. Dazu gehören dezentrale Wärmepumpen (sofern im Kontext machbar) und Holzheizungen (sofern es diesbezüglich keine behördlichen Einschränkungen gibt). Die Gründe dafür, dass im Gebäudeparkmodell nicht die Investitionskosten entscheidend sind für die Systemwahl, sondern die gesamten Lebenszykluskosten, d.h. dass alle Leistungsbereiche betrachtet werden (also nicht nur die aus Bivalenzsicht vorteilhaften und dass das Entscheidungsmodell im GPM bis zu einem gewissen Mass auch Systeme wählt, die höhere Lebenszykluskosten aufweisen (wie es auch in der Praxis der Fall ist, z.B. wegen spezifischen Präferenzen)
 - LICS-Lösungen in Form von bivalenten Systemen nehmen eine gewisse, aber keine überragende energie- und gebäudewirtschaftliche Rolle ein. Monovalente behalten auch in einem Szenario, in dem noch 6 kg CO₂ pro m² EBF zulässig wären, eine grössere Bedeutung im Vergleich zu bivalenten. Im Kontext einer solchen Anforderungen entfalten sie v.a. einen ökonomischen bzw. finanziellen und einen umsetzungsspezifischen Nutzen für die Gebäudeeigentümer (nicht so hohe Investitionskosten, Übergangslösung, falls ein kompletter Umstieg aus technischen oder anderen Gründen noch nicht in Frage kommt). In der energie- und klimapolitischen Umsetzung kann dies durchaus von Belang sein, vor allem wenn entsprechende Anforderungen Ausnahmeklauseln aus wirtschaftlichen Gründen enthalten (wie es beim subsidiären Verbot von fossilen Energieträgern mutmasslich der Fall gewesen wäre) oder wenn sie sogar explizit Ausnahmen zulassen, wenn die Lebenszykluskosten bestimmte Mehrkosten überschreiten (wie im Fall des im Herbst 2021 vom kantonalzürcherischen Stimmvolk angenommenen Energiegesetzes).
 - Die indirekten Emissionen aus der Erzeugung und Bereitstellung von Sekundärenergieträgern wie Strom, Biogas, Fernwärme nehmen in einem Szenario mit einer Beschränkung der direkten Emissionen auf 6 kg CO₂ pro m² EBF am Ende der Betrachtungsperiode eine hohe Bedeutung ein. Entsprechend ist bei der Dekarbonisierung des Gebäudesektors nicht nur dieser zu adressieren, sondern auch die Energiewirtschaft.

Gegeben deren Charakter lassen sich als Fazit drei verschiedene Typen von LICS-Lösungen unterscheiden (diese Kategorisierung ist auch nützlich im Hinblick auf die Formulierung von Handlungsempfehlungen):

- LICS Typ 1: Unterstützende LICS-Massnahmen, die dazu dienen, den Einsatz von erneuerbaren Systemen auf eine effiziente Art zu ermöglichen. Dazu gehören gezielte Wärmedämmungen (Gebäudehülle, Heiz- und Warmwasserverteilung), punktuelle Anpassungen bei der Wärmeabgabe wie z.B. Vergrössern einzelner Radiatoren, hydraulischer Abgleich, Reduktion des thermisch wirksamen Luftwechsels durch diverse Massnahmen, Überprüfen und Anpassen von diversen Betriebsparametern wie Solltemperaturen, Heizkurven, Einsatzzeiten von Umwälzpumpen u.w.m.). Die Prüfung dieser unterstützenden Massnahmen kann grundsätzlich uneingeschränkt empfohlen werden, wenn sie der Vorbereitung von LICS-Massnahmen des Typs 1 und 2 dienen. Kosteneffizienz und Praktikabilität sind im Einzelfall zu prüfen.
- LICS Typ 2: Bivalente Systeme mit einem Hauptfokus auf erneuerbare Energiequellen und einem Restanteil von fossilen Energieträgern (oder von Biogas). Diese werden als Übergangslösung auf dem Weg zur kompletten Dekarbonisierung eingestuft. Sie sind entsprechend dann zu empfehlen, wenn sie als eine von weiteren Dekarbonisierungsmassnahmen gesehen wird, die dazu dient, rasch einen markanten Effekt zu erzielen und die Umsetzung der kompletten Dekarbonisierung (LICS-Massnahmen des Typ 3, weitere Effizienzsteigerung) zu ermöglichen, ggf. zu einem späteren Zeitpunkt.
- LICS Typ 3: Komplett erneuerbare LICS-Lösungen wie z.B. monovalente Wärmepumpen, Holzheizungen (Pellets und/oder Schnitzel) oder den Anschluss an Nah- oder Fernwärmenetze, dessen Wärme (und Kälte) erneuerbar erzeugt wird. Welche dieser Lösungen lokal möglich ist, hängt zum einen von der Standorttypologie ab (thermisches Netz verfügbar ja/nein, Holzheizung bewilligungsfähig ja/nein, Umweltwärme lokal verfü- und nutzbar ja/nein, Lärmschutzanforderung zu erfüllen ja/nein) und zum anderen von den lokalen und gebäudespezifischen Verhältnissen, die im Einzelfall zu prüfen sind.

Zu betonen ist hierbei, dass sowohl bei den LICS-Massnahmen des Typs 2 als auch des Typs 3 es wesentlich ist, dass sich die Energiewirtschaft (Strom, Gas, Fernwärme) ebenfalls dekarbonisiert, damit auch die indirekten Emissionen aus der Erzeugung und Bereitstellung dieser Energieträger vermieden werden können.

8.2 Handlungsempfehlungen

Bezugnehmend auf die in diesem Projekt erzielten Ergebnisse und Schlussfolgerungen sowie auf weitere Grundlagen und Erkenntnisse werden nachfolgend Anreize und Ansätze konkretisiert, die zur tatsächlichen Umsetzung der Low-Invest-Cost-Sanierungsstrategien beitragen können. Deren Umsetzung trägt zu den Zielen der Energiestrategie 2050+ und zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors bei.

Die Empfehlungen, wie die Umsetzung der LICS adäquat gefördert werden kann, adressieren sowohl die Ebene Einzelgebäude bzw. einzelne Lösungen als auch die Ebene Gebäudepark. Entsprechend ergehen die Empfehlungen zum einen an Bauherren, Planer, Industrie und Gebäudetechnikbranchen und zum anderen an die Energie- und Klimapolitik.

Grundsätzlich sind verschiedene Ansätze denkbar, um die Attraktivität der im Projekt ausgearbeiteten LICS-Ansätze zu erhöhen: finanzielle Anreize wie Förderbeiträge, Tarifierungs-massnahmen, gesetzliche Anforderungen, das Gewähren von Ausnahmen, informative Initiativen, Aus- und Weiterbildung und weitere mehr. Üblicherweise ist ein Bündel von aufeinander abgestimmten Massnahmen zielführender als das Fokussieren auf einen Massnahmentyp. Die Massnahmen sollen zudem auf den Gesamtkontext und auf eine übergreifende Zielsetzung abgestimmt werden.

Nach dem Zeitpunkt der Ausschreibung dieses Projekts (2018) und während Projektbearbeitung haben sich die energie- und klimapolitischen Zielsetzungen deutlich verändert, namentlich durch den Beschluss des Bundesrates, ein Netto-Null-Ziel zu verfolgen. Dies impliziert eine weitgehende bis vollständige Dekarbonisierung des Gebäudeparks (siehe Energieperspektiven 2050+). Gemäss EP 2050+ ist damit auch eine weitgehende Ablösung der Versorgung des Gebäudesektors mit Gas verbunden (ausser in der Variante ZERO-B). Dies bedeutet, dass bivalente Lösungen nur für eine vorübergehende Periode auf fossile Energieträger setzen können, was aber in einem Transformationsprozess trotzdem nützlich sein kann.

Wir strukturieren nachfolgend unsere Handlungsempfehlungen hinsichtlich der verschiedenen Akteure, welche bei der Umsetzung von LICS und anderen Effizienz- und Dekarbonisierungsmassnahmen im Gebäudebereich eine wichtige Rolle spielen (sollten).

GEBÄUDEEIGENTÜMER

Allen Gebäudeeigentümern, ob privaten oder institutionellen, ist die Erstellung einer Ist-Analyse und eines Langfristplans im Sinne einer Erneuerungs- und Dekarbonisierungsstrategie zu empfehlen. Darin sind der Ist-Zustand zu analysieren, der Bedarf an Massnahmen und die damit verbundenen Investitionsbedürfnisse, die Wirtschaftlichkeit und die Energie und Emissionsfolgen aufzuzeigen. Insbesondere soll auf LICS-Massnahmen hingewiesen werden, sowohl auf vorbereitende des Typs 1 als auch auf mögliche Übergangslösungen (LICS Typ 2) und komplette Dekarbonisierungsmassnahmen (Typs 3). Wichtig sind hierbei finanzielle und wirtschaftliche Aspekte sowie eine Erweiterung des Betrachtungsperimeters. Dieser soll auch den Gebäudekontext einbeziehen, sowohl den aktuellen als auch den künftigen unter Einbezug der Energieversorger und der Gemeinde (bezugnehmend auf die kommunale Energieplanung, falls vorhanden). Das Programm «erneuerbarheizen» von EnergieSchweiz deckt diese Art von Beratung bereits weitgehend ab. Insbesondere bivalente Lösungen werden im Excel-Tool für «grosse Mehrfamilienhäuser (gMFH)» bereits angemessen abgebildet. Auch mit dem Heizkostenvergleichsrechner der Hochschule Luzern, in den die in diesem Projekt erhobenen Daten eingeflossen sind, lassen sich bivalente System abbilden. Zusätzliche Unterstützung für Berater und Gebäudeeigentümer könnten die vom Umweltschutz und Gesundheit der Stadt Zürich (UGZ) entwickelten Merkblätter für eine schlanke Auslegung der Wärmeerzeugung im Heizungsersatz sowie zur Reduktion der Heizvorlauf-temperaturen beim Heizungsersatz beisteuern. Je nach Eigentübertyp und dessen Professionalität ist der Bezug von externer Unterstützung durch Planende, Installateure und ggf. Banken zu empfehlen. Damit sollen ein Bewusstsein und Grundlagen für kurz, mittel- und langfristige Entscheidungen geschaffen werden.

Es ist zu empfehlen, dass Inhalte und Struktur der Erneuerungs- und Dekarbonisierungsstrategien grob nach Gebäude- und Eigentübertyp differenziert werden. Insbesondere ist zwischen EFH und kleinen MFH auf der einen Seite und grösseren MFH und NWG auf der anderen Seite zu unterscheiden, weil bivalente LICS-Lösungen gemäss Projektergebnissen v.a.

für letztere von Relevanz sind (es ist jedoch im Auge zu behalten, ob die Industrie auch für den kleinen Leistungsbereich einfach bivalente Kompaktgeräte anbieten wird, dies als Antwort auf die derzeit laufenden Bestrebungen der EU, die Ecodesign-Richtlinie zu verschärfen (nach dieser soll der Wirkungsgrad bezogen auf die nicht-erneuerbare Energie zunächst auf 110% und in den kommenden Jahren sukzessive weiter gesteigert werden).

GEBÄUDEEIGENTÜMER- UND IMMOBILIENVERBÄNDE

Den Gebäudeeigentümer- und Immobilienverbänden wird empfohlen, ihre Mitglieder bei der Dekarbonisierung ihrer Gebäude und ihrer Immobilienportfolios zu unterstützen. Angesprochen sind zum einen die eigentlichen Eigentümerverbände wie HEV, Hausverein, IPB, KBOB, property owner, Fiabci etc. und zum anderen Bewirtschaftungsverbände wie SVIT, VIS-AIS. Bestehende Angebote und Bestrebungen könnten insbesondere ergänzt werden durch:

- Über schrittweises Vorgehen bei der energetischen Erneuerung und Dekarbonisierung und der spezifischen Rolle von LICS-Lösungen kommunizieren und dabei die Rolle der drei LICS-Typen deutlich machen.
- Vorlagen und Best practice Beispiele zur Erstellung von Erneuerungs- und Dekarbonisierungsstrategien bereitstellen (Themen und Inhalte siehe oben).

GEBÄUDETECHNIKBRANCHE

Die Arbeiten im Rahmen des LICS-Projekts (und weitere Arbeiten) haben die grosse Rolle der Gebäudetechnik bei der Dekarbonisierung des Gebäudebereichs deutlich aufgezeigt. Dies betrifft sowohl das Gebäude im Einzelnen, seine Einbettung in den lokalen Kontext und den Gebäudepark als Ganzes. Die Handlungsempfehlungen betreffen die folgenden beiden Ebenen:

- Den Installateuren wird entsprechend empfohlen, die Vorteile und den zusätzlichen Spielraum, der sich durch LICS-Lösungen ergibt, aufzuzeigen und in ihre Aktivitäten einbeziehen, auch und nicht zuletzt bei den beratenden Tätigkeiten. Zudem kann die Gebäudetechnikbranche sowohl Haus- und Gebäudeeigentümer als auch Bewirtschaftende bei der Erstellung von Erneuerungs- und Dekarbonisierungsstrategien unterstützen, da Unternehmen der Gebäudetechnikbranche oft erster Ansprechpartner dieser Akteursgruppe sind.
- Den Anbietern und Herstellern von Heizanlagen wird empfohlen, die bivalenten Konzept, die in ausgewählten Bereichen eine dezidierte Rolle bei der Dekarbonisierung spielen können, weiterzuentwickeln. Die Weiterentwicklung soll insbesondere folgende Aspekte adressieren:
 - weitere Reduktion der Investitionskosten, z.B. durch das Bereitstellen von einfach zu installierenden bivalenten Kompaktgeräten (unterer bis mittlerer Leistungsbereich) und von modularen Ansätzen (oberer Leistungsbereich).
 - Vereinfachung der Planung und Installation durch Automatisierung, Plug and Play Ansätze
 - Reduktion der Betriebs- und Unterhaltskosten (bei bivalenten Heizungsanlagen erfolgt die Wartung von Wärmepumpe und Heizkessel bisher in der Regel durch zwei unterschiedliche Fachleute, was sich entsprechend auf die Wartungskosten auswirkt), z.B. durch gezielte Aus- und Weiterbildung der Servicetechniker und

durch automatisierte und fernüberwachte Einregulierung und Betriebsführung, unterstützt z.B. durch selbstlernende Algorithmen (Machine learning)

ENERGIEBRANCHE

Auch der Energiebranche kommt eine grosse Bedeutung zu, wenn es darum geht, den Gebäudepark der Schweiz zu dekarbonisieren. Je nach Ausgangslage und Charakter der einzelnen Energieträger und -infrastrukturen sind die Empfehlungen zu differenzieren. Für spezialisierte Unternehmen bzw. für Querverbundsunternehmen gelten die Empfehlungen sinngemäss für den oder die jeweiligen Energieträger, sowohl die aktuellen als auch die im Rahmen von Geschäftserweiterungen geplanten.

- Gas: im Kontext der Dekarbonisierung ist die Versorgung mit fossilem Gas durch Alternativen zu ersetzen. Angebote mit Biogas oder mit synthetisch und erneuerbar erzeugtem Gas (PtG) stellen zwar eine Dekarbonisierungslösung dar und sie sind zum Teil aus Gebäudesicht auch als Low-Invest-Cost zu bezeichnen.²³ Aus verschiedenen Gründen²⁴ ist jedoch davon auszugehen, dass das Gasnetz zum Teil rückgebaut werden wird. Gasversorgungsunternehmen ist zu empfehlen, ihr Angebot, wenn möglich zu diversifizieren oder mit anderen EVU zusammenzuarbeiten und ihre Kunden bei der Dekarbonisierung ihrer Gebäude zu unterstützen, nicht zuletzt mit bivalenten LICS-Lösungen. Diese sind in der Regel als Übergangslösung zu konzipieren und können gerade bei Aufbau von thermischen Netzen eine entscheidende strategische Rolle spielen.²⁵ Unternehmen, die thermische Netze bereits im Angebot haben oder die sich in Richtung diversifizieren wollen, können bivalente LICS-Lösungen in ihr Angebot von Übergangslösungen integrieren.
- Fern- und Nahwärme, thermische Netze: aus Sicht der Gebäudeeigentümer stellt der Anschluss an ein thermisches Netz eine investitionskostengünstige und technisch relativ einfach zu installierende Möglichkeit dar, die direkten CO₂-Emissionen komplett auf null zu setzen. Energieunternehmen, die Wärme aus solchen Netzen anbieten, ist zu empfehlen, dass sie Gebäudeeigentümer frühzeitig und pro-aktiv informieren.

²³ Mit Biogas oder synthetischem erneuerbarem Methan kann die bisherige Infrastruktur weiter genutzt werden, gerade auch innerhalb des Gebäudes, d.h. diese Lösungen vergleichen sich mit aktuellen Gaslösungen. Bei synthetisch erneuerbar erzeugtem Wasserstoff ist u.U. mit Mehrkosten zu rechnen, z.B. für die Anpassung von Endgeräten wie Kesseln oder beim Einsatz von Brennstoffzellen (beide Varianten wurden im vorliegenden Projekt nicht näher untersucht). Es ist zudem mit der Möglichkeit zu rechnen, dass ein Teil der Bereitstellungskosten von solchem Wasserstoff in Form von Anschlussgebühren oder Leistungskosten an die Gebäudeeigentümer verrechnet wird, was die Kosten auch auf Investitionsebene erhöhen würde (und nicht nur auf der betrieblichen).

²⁴ Untern anderem aufgrund der begrenzten Potenziale, der zum derzeitigen Wissensstand eher ungünstigen Wirtschaftlichkeit aus Lebenszyklussicht und weil sich Gebäudeeigentümer zunehmend für Alternativen entscheiden.

²⁵ Wie die Modellarbeiten im Rahmen der WIS-Studie und der EP 2050+ gezeigt haben, ist ein rascher Aufbau solcher Netze aus strategischer Sicht sehr wichtig. Bei einem zu langsamen Aufbau und ohne das Angebot von Übergangslösungen werden sich (zu) viele Gebäudeeigentümer für dezentrale Lösungen entscheiden (von diejenigen, denen das möglich ist), was zum Nachteil sowohl der thermischen Netze als auch der Gebäudeeigentümer, bei denen dezentrale Lösungen schwierig umzusetzen, ist.

BEHÖRDEN AUF BUNDES-, KANTONS- UND GEMEINDEEBENE

Aus Kostensicht stellen sich nicht nur mono- oder bivalente, auf WP basierende Systeme als LICS dar, sondern auch thermische Verbunde (Fernwärme, Nahwärme), biogene und synthetische erneuerbare Gase sowie (individuelle) Holzheizungen. Einige dieser Systeme weisen gewisse Nachteile auf, entweder bzgl. begrenzter verfügbarer Potenziale oder Potenzialnutzungsansprüchen aus übergeordneter Sicht oder aus wirtschaftlicher Sicht aus der LZK-Optik oder aus beiden Gründen. Dem Bund wird deshalb empfohlen:

- Eine Gesamtstrategie zu erstellen (die Grundlagen wurden mit den überarbeiteten Energieperspektiven 2050+ gelegt) und dabei auch die Kosteneffizienz und umsetzungsspezifische Aspekte zu berücksichtigen (z.B. das Gewähren oder Fördern von Übergangslösungen). Daraus abgeleitet sollen energie- und klimapolitische Instrumente definiert und umgesetzt werden, z.B. ähnlich einer Beschränkung der Emissionen pro m² auf 6 kg CO₂ oder gemäss einem vorhersehbaren Absenkpfad. Gesetzgebungen auf Bundes- und Kantonsebene sind aufeinander abzustimmen.
- Bezogen auf LICS-Lösungen sind diesbezüglich weitere Abklärungen zu treffen bzw. Forschungsarbeiten durchzuführen, um festzustellen, inwiefern und in welchem Ausmass Gebäudeeigentümer auf LICS-Lösungen ansprechen und welche Eigenschaften (z.B. Einfachheit, Fossilfreiheit, Kostengünstigkeit etc.) diese aufweisen müssten (das Vorgehen könnte ähnlich erfolgen wie im BFE-Projekt MISTEE, in dem die Investitionsbereitschaft von verschiedenen Optionen als Funktion ihrer Attribute eruiert wurde).
- Prüfen, wie Lärmschutzvorschriften angepasst werden könnten, z.B. um die Lärmemissionen der WP im Gesamtkontext zu beurteilen und um auch betriebliche Lärmschutzmassnahmen zu ermöglichen (z.B. die Berücksichtigung einer zeitlich abgestuften Betriebsweise).

Den Kantonen wird empfohlen, ihre kantonalen Gesetzgebungen, Strategien und Umsetzungsaktivitäten verstärkt auch auf das Thema Dekarbonisierung auszurichten. Im Konkreten ist zu empfehlen,

- Den Ansatz bei gesetzlichen Anforderungen zeitlich und räumlich zu erweitern, so dass Gebäudeareale, Nachbarschaften vernetzt werden und thermische Verbunde entstehen können. Gesetzgebungen auf Bundes- und Kantonsebene sind aufeinander abzustimmen.
- Bewilligungsverfahren zu vereinfachen und zu dynamisieren, z.B. durch das Gewähren (oder gar Fördern) von Übergangslösungen (welche vertraglich oder als Auflage an Bedingungen zu knüpfen sind, konkret an eine weitergehende Dekarbonisierung).
- Die Gemeinden bei der Planung und Umsetzung von kommunalen Energieplänen mit Daten, methodisch, beratend und finanziell zu unterstützen.

Ob eine dezentrale erneuerbare Lösung, eine bivalente LICS-Lösung und/oder ein thermisches Netz der zielführendste Weg zur Dekarbonisierung des Gebäudeparks ist, hängt stark von den zu berücksichtigenden Kriterien (Effizienz, Effektivität, Kostengünstigkeit aus Gemeindesicht, Wirtschaftlichkeit aus Eigentümersicht, Klimaverträglichkeit etc.) und vom lokalen Kontext (Quartiers- und Zonentyp, Bebauungsdichte, Nutzungsmix, Platzverhältnisse etc.) ab. Um den Gebäudeeigentümern und den Energieunternehmen neue Perspektiven zu eröffnen und Planungssicherheit zu schaffen, wird den Gemeinden empfohlen:

- Energie- und klimapolitische Instrumente zu definieren und umzusetzen (z.B. ähnlich einer Beschränkung der Emissionen pro m² auf 6 kg CO₂ oder gemäss einem vorhersehbaren Absenkpfad).
- Eine kommunale Energieplanung 2.0 zu erstellen, die über die bisher üblichen Ansätze hinaus geht. Insbesondere ist der Beurteilung der Machbarkeit von dezentralen Systemen, namentlich solchen, die auf Luft/Wasser-WP beruhen, eine höhere Bedeutung beizumessen. Dies kann beispielsweise mit GIS-basierten Analysen erfolgen, welche die Eignung dieser Systeme kategorisiert (beispielsweise mit einem Ampelsystem). Auch die Machbarkeit bzw. die spezifischen Kosten von thermischen Netzen kann auf eine geeignete Art in solche kommunalen Energiepläne integriert werden. Entsprechende Grundlagen sollen regelmässig aktualisiert und in Form von GIS-Browsern, georeferenzierten Datensätzen oder anderer geeigneter Form zur Verfügung gestellt werden.
- Im Hinblick auf die Umsetzung von kommunalen Energieplänen wird im Allgemeinen empfohlen, mit den verschiedenen Ebenen zusammen zusammenzuarbeiten (Gebäudeeigentümer und Immobilienwirtschaft, Mietende, lokale und weitere Energieunternehmen, Gebäudetechnikbranche).

Im Konkreten ist zu empfehlen, dass Bewilligungsverfahren vereinfacht und dynamisiert werden, z.B. durch das Gewähren (oder gar Fördern) von Übergangslösungen (welche vertraglich oder als Auflage an Bedingungen zu knüpfen sind, konkret an eine weitergehende Dekarbonisierung).

9 Verbreitung und Anwendung der Forschungsergebnisse

9.1 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die im Rahmen des LICS-Projekts erarbeiteten methodischen und datenseitigen Grundlagen und Ergebnisse sowie die qualitativen Erkenntnisse haben in verschiedenen nationalen und internationalen Projekten Eingang gefunden.

9.1.1 Nationale Zusammenarbeit

Die im Rahmen des LICS-Projekts erhobenen Kostendaten dienten als Grundlage für weitere Projekte, die im Auftrag des Bundesamts für Energie und weiterer Auftraggeber durchgeführt wurden. Dazu gehören namentlich die BFE-Energieperspektiven 2050+ sowie der Heizkostenrechner der Hochschule Luzern. Letzterer wurde basierend auf den methodischen Arbeiten im LICS-Projekt auch konzeptionell weiterentwickelt: neu besteht die Möglichkeit, pro Kostenpunkt bis zu drei unterschiedliche Schwierigkeitsstufen zu berücksichtigen. Auch diverse bivalente Anlagen können nun im Heizkostenrechner abgebildet werden. Zu diesem Zweck wurden die Kostenerhebungen im Anschluss an die empirischen Arbeiten des LICS-Projekts weitergehend ergänzt. Der Heizkostenrechner mit den erweiterten Funktionalitäten und den aktualisierten Kostenkennwerten kann ab Oktober 2022 bei der Hochschule Luzern oder bei TEP Energy bestellt werden.

Die im Rahmen des LICS-Projekts erarbeiteten Kostenkennwerte flossen zudem in das Design der sog. Choice Experimente des BFE-EWG-Forschungsprojekts MISTEE ein. Die darauf basierenden Ergebnisse wurden im Herbst 2022 in Form von drei Working papers durch die Uni Neuenburg publiziert.

Eine weitere Ebene der nationalen Zusammenarbeit betrifft die räumlichen Analysen. Zum einen konnte bei den GIS-Analysen im LICS-Projekt auf den im Rahmen anderer Projekte²⁶ von TEP Energy aufgebauten Methoden aufgebaut werden (zusammengefasst unter dem Namen Räumliche Energieanalyse Toolbox, REAT). Zum anderen kann auf den im LICS-Projekt erarbeiteten Ergebnissen und GIS-Methoden aufgebaut werden, um diese weiter zu vertiefen. Dies erfolgt konkret im Rahmen des Projekts SURE als Teil des BFE-Forschungsprogramms SWEET. In diesem Projekt wird u.a. die Resilienz und die Nachhaltigkeit des Energiesystems der Schweiz und von Regionen untersucht. Hierbei spielen auch Akzeptanzfragen und regulatorische Anpassungen eine Rolle und insbesondere bei der Lärmthematik bestehen diesbezüglich bei der weiteren Entwicklung gewisse Unsicherheiten.

Sowohl die Kostenkennwerte als auch die räumlichen Analysemethoden können im Rahmen weiterer Projekte verwendet werden, u.a. für lokale Energiepotenzialanalysen und für kommunale Energieplanungen. Erste Umsetzungen konnten bereits realisiert werden bzw. sind im Gang.

²⁶ Studie zur Dekarbonisierung des Wärmesektors im Rahmen der Wärme-Initiative Schweiz (WIS) und BFE-Energieperspektiven

9.1.2 Internationale Zusammenarbeit

Ausgewählte Ergebnisse und Erkenntnisse waren und sind auch in internationalen Zusammenarbeiten von Relevanz. Dazu gehört u.a. ein Projekt in Zusammenarbeit mit Agora Energiewende, bei dem untersucht wird, wie die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern in Europa rasch reduziert werden kann. In einer Übergangsphase können bivalente LICS-Lösungen eine wichtige Rolle finden: in europäischen Städten und urbanen Räumen stellen sich bzgl. der Nutzung von dezentralen erneuerbaren Potenzialen ähnliche Fragestellungen und Limitationen wie in der Schweiz, d.h. in einer ersten Phase können bestehende fossile Anlagen mit einer Wärmepumpe ergänzt werden. Auch die Erkenntnisse aus den räumlichen Analysen bzgl. der Limitationen von dezentralen Luft/Wasser-WP und bzgl. der Potenziale von leitungsgebundenen Energieversorgungen zur Nutzung von ortsgebundenen erneuerbaren Energiequellen können sinngemäss auf andere Länder übertragen werden.

Die Ergebnisse zu den Kostendaten der verschiedenen Heizsysteme, insbesondere auch zu den bivalenten Lösungen, fliessen auch in die geplante techno-ökonomische Datenbank ein, die im Kontext des EIT Climate-KIC Projekts MEDIUS und im Rahmen weiterer Projekte für die Schweiz und für weitere Länder geplant ist. Zudem ist vorgesehen, die lokalen Potenziale und Limitationen in eine georeferenzierte App zu integrieren, wobei die Erkenntnisse aus dem LICS-Projekt genutzt werden sollen (namentlich zur Beurteilung der Machbarkeit von Luft/Wasser-WP).

9.2 Kommunikation und Publikationen

Die erarbeiteten Resultate und Erkenntnisse aus dem LICS-Projekt wurden in verschiedenen Formen publiziert bzw. vorgestellt oder im Rahmen weiterer Projekte genutzt:

- Fachartikel auf der allgemeinverständlichen Ebene mit dem Titel „Es muss nicht immer eine teure Gesamterneuerung sein“ in Zusammenarbeit mit Vogel Kommunikation:
 - Baurundschau, Ausgabe 4/2022, Oktober 2022, Editorial Media Group AG, S. 96 bis 99
 - Energiefachbuch 2023, 29.11.2022, KünzlerBachmann Verlag AG, S. 6 bis 9
 - Baublatt, Docu Media Schweiz GmbH (geplant, Publikationstermin offen)
 - Webseite des Bundesamts für Energie, 01.12.2022, abrufbar unter <https://pubddb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11206>
- Präsentation am 22. Status Seminar zum Thema „SustainDesign“ (Martin Jakob, Müller, Ménard, & Lamster, 2022)
- Überarbeitung und Erweiterung der Kostenkennwerte für den Heizkostenvergleichsrechner der HSLU (Martin Jakob, Melliger, et al., 2022)
- Verwendung der Kostenkennwerte sowie der Erkenntnisse zur Rolle von bivalenten Systemen in einem Projekt in Zusammenarbeit mit AGORA (Buck et al., 2022)

Weitere Kommunikationsaktivitäten sind angedacht oder in Planung, auch in Zusammenarbeit mit Mitgliedern der Begleitgruppe und mit Kantonsvertretern.

10 Literaturverzeichnis

- Banfi, S., Farsi, M., Jakob, M., Häberli, A., Karydas, K., Manser, J., & Volkart, K. (2012). *An Analysis of Investment Decision for Energy-Efficient Renovation of Multi-Family Buildings*. Centre for Energy Policy and Economics (CEPE) ETH Zürich und TEP Energy i.A. Bundesamt für Energie (BFE). Zürich.
- Banfi, S., Ramseier, C., Filippini, M., Alberini, A., Jakob, M., & Knellwolf-Pióro, D. (2011). *Erneuerung von Einfamilienhäusern – Eine mikroökonomische Analyse für ausgewählte Schweizer Kantone*. Studie des CEPE der ETH Zürich i.A. Bundesamt für Energie.
- BFE. (2019). *Künftige Rolle von Gas und Gasinfrastruktur in der Energieversorgung der Schweiz*. Bern.
- BFS. (2021a). *Schweizerischer Baupreisindex 2011*. Retrieved January 15, 2021, from <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/tabellen.assetdetail.290612.html>
- BFS. (2021b). *Schweizerischer Baupreisindex 2020*. Retrieved January 15, 2021, from <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/tabellen.assetdetail.13267143.html>;
- Buck, M., Dusolt, A., Hein, F., Redl, C., Graf, A., Holl, M., ... Baccianti, C. (2022). *Regaining Europe's Energy Sovereignty 15 Priority Actions for RePowerEU IMPULSE*, (March), 1–39. Retrieved from https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_07_EU_GEXIT/253_Regaining-Europes-Energy-Sovereignty_WEB.pdf
- Bundesamt für Umwelt. (2019). *Faktenblatt. CO₂-Emissionsfaktoren des Treibhausgasinventars der Schweiz*.
- Bundesrat. (2019). *CO₂-Reduktion durch Anschluss an das Fernwärmenetz - Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulats 17.3253 Graber vom 17. März 2017*.
- Cozza, S., Chambers, J., Geissler, A., Wesselmann, K., Gambato, C., Branca, G., ... Patel, M. K. (2019). *GAPxPLORE: Energy Performance Gap in existing, new, and renovated buildings*.
- energie-experten.org. (2021). *Experten-Ratgeber: Technik und Fensterlüfter-Modelle im Vergleich*. Energie Experten. Retrieved January 4, 2022, from <https://www.energie-experten.org/bauen-und-sanieren/fenster/fenstertechnik/fensterluefter>
- Fischer R., Ehrbar D., Kobler R., Bürgin M., Forny R., Birkendahl Y., ... Schwehr P. (2012). *SanStrat - Ganzheitliche Sanierungsstrategien für Wohnbauten und Siedlungen der 1940er bis 1970er Jahre*. Hochschule Luzern HSLU. Luzern.
- Fischer, R., & Schwehr, P. (2010). *Building Typology and Morphology of Swiss Multi-Family Homes 1919-1990*. Hochschule Luzern, Kompetenzzentrum Typologie & Planung in Architektur (CCTP). Luzern.
- Gasser, L. (2019). *Luft/Wasser-Wärmepumpen im städtischen Bestand*.
- Gross, C. (2018). *Faktenblatt CO₂-Emissionsfaktoren für die Berichterstattung der Kantone*. BAFU. Retrieved from

https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/EF_CO2_Berichterstattung_Kantone.pdf

- hausinfo. (2021). *Was bringt eine kontrollierte Wohnraumlüftung?* Retrieved from <https://hausinfo.ch/de/bauen-renovieren/haustechnik-vernetzung/heizung-lueftung-klima/kontrollierte-wohnraumluftung.html#:~:text=Bei Mehrfamilienhäusern liegen die Kosten,000 und 8'000 Franken.>
- Heeren, N., Jakob, M., & Wallbaum, H. (2009). *Vorstudie zum Gebäudeparkmodell Schweiz – Machbarkeitsuntersuchung anhand des neuen SIA-Effizienzpfades Energie*. ETH Zürich und TEP Energy i.A. Bundesamt für Energie. Bern.
- Hoffmann, C., Geissler, A., Ménard, M., & Carisch, L. (2017). *PRO380: Offene Fragen beim Einsatz der SIA 380/1 als Prognoseinstrument bei Bestandsgebäuden (Wohnbauten)*. Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW und Lemon Consult AG i.A. Bundesamt für Energie. Bern.
- HSLU. (2020). *Software Tools Heizkostenvergleichsrechner*. Retrieved from <https://www.hslu.ch/de-ch/technik-architektur/ueberuns/organisation/kompetenzzentren-und-forschungsgruppen/bau/gebaeudetechnik-und-energie/software-tools/>
- Huber, M., Kühne, F., Pestalozzi, C., & Rüdener, K. (2011). *EAK Energiekennwerte Elementaren Katalog*. CRB.
- Huber, R., & Rügsegger, S. (2019). *Wirkungsvolle Schalldämmmassnahmen bei Lufts/Wasser-Wärmepumpen Anlagen*. FWS-Fachtagung Spreitenbach.
- ISE. (2020). *Wärmepumpen in Bestandsgebäuden - Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt "WPsmart Im Bestand."*
- Iten, Jakob, Wunderlich, Sigris, Catenazzi, & Reiter. (2017). *Auswirkungen eines subsidiären Verbots fossiler Heizungen – Grundlagenbericht für die Klimapolitik nach 2020*. Infrac, TEP Energy i.A. BAFU. Zürich/Bern.
- Jakob, M., Weinberg, L., Nägeli, C., Catenazzi, G., & Palacios, A. (2021). *Analysis of Uncertainties and Sensitivities using Swiss building stock models*. IEA EBC Annex 70, SFOE.
- Jakob, M, Grodofzig, F. B., & Gross, N. (2010). *Energetische Gebäudeerneuerungen – Wirtschaftlichkeit und CO₂-Vermeidungskosten. Eine Auswertung des Gebäudeprogramms der Stiftung Klimarappen*. TEP Energy, Meier+Steinauer, HSLU i.A. Stiftung Klimarappen. Zürich.
- Jakob, M, Martius, G., Catenazzi, G., & Berleth, H. (2014). *Energetische Erneuerungsraten im Gebäudebereich – Synthesebericht zu Gebäudehülle und Heizanlagen*. TEP Energy i.A. Bundesamt für Energie. Bern.
- Jakob, M, Ott, W., Bolliger, R., Von, G. S., Kallio, S., Nägeli, C., & Ott, W. (2014). *Integrated strategies and policy instruments for retrofitting buildings to reduce primary energy use and GHG emissions (INSPIRE), Generic strategies for buildings in Switzerland, Swiss contribution to the era-net "ERACOBUILD" - Final Report*. TEP Energy, econcept, Lund University, Aalborg University, University of Timisoara, VTT i.A. Swiss Federal Office of Energy (SFOE), FORMAS – The Swedish Research Council Formas, Danish Enterprise

- and Construction, TEKES – The Finnish Funding Agency for In.
- Jakob, Martin, Jochem, E., & Christen, K. (2002). *Grenzkosten bei forcierten Energie-effizienz-mass-nahmen bei Wohngebäuden*. CEPE, HBT, ETH Zürich i.A. Studie im Auftrag des Forschungs-pro-gramms EWG des Bundesamts für Energie (BFE). Bern.
- Jakob, Martin, Melliger, M., Müller, J., Talary, Z., Ménard, M., & Creti, F. (2022). *Aktuelle Kosten und Wirtschaftlichkeit von Heizsystemen Erhebungen*. TEP Energy, Low-Tech Lab und Raumanzug i.A. VSG. Zürich.
- Jakob, Martin, Müller, J., Lamster, J., & Ménard, M. (2022). *No Low-Invest-Cost Sanierungen (LICS) Anhangsbericht*. TEP Energy, Low-Tech Lab und Durable i.A. BFE.
- Jakob, Martin, Müller, J., Ménard, M., & Lamster, J. (2022). *Low-Invest-Cost-Sanierungen (Vortrag am Status-Seminar)*. TEP Energy, Low-Tech Lab und Durable i.A. BFE. Aarau.
- Jakob, Martin, Reiter, U., Catenazzi, G., Sunarjo, B., Lienhard, L., Müller, A., ... Nägeli, C. (2020). *Erneuerbare- und CO₂-freie Wärmeversorgung Schweiz: Eine Studie zur Evaluation von Erfordernissen und Auswirkungen*. TEP Energy und ECOPLAN i.A. AEE SUISSE, Wärmeinitiative Schweiz (WIS). Zürich.
- KBOB. (2014). *Ökobilanzdaten im Baubereich – Empfehlung 2009/1:2014*. KBOB.
- KBOB. (2016). *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2016*.
- Kemmler, A., Kirchner, A., Kreidelmeyer, S., Piégsa, A., Spillmann, T., Dambeck, H., ... Lienhard, L. (2021). *Energieperspektiven 2050 + Technischer Bericht Gesamtdokumentation der Arbeiten*. Prognos, INFRAS, TEP Energy und Ecoplan i.A. BFE. Bern.
- Khoury, J., Hollmuller, P., Lachal, B., Schneider, S., & Lehmann, U. (2018). *Compare Renove: du catalogue de solutions à la performance réelle des rénovations énergétiques. Ecart de performance, bonnes pratiques et enseignements tirés*. Office fédéral de l'énergie OFEN.
- Knechtli, D. (2019). *Heizkostenvergleichsrechner - Version 2*. AWEL.
- Kriesi, R. (2013). *Niedertemperatur-Radiator für die Nachrüstung mit Wärmepumpen*. Zehnder NovaNeo. FWS-Fachtagung Schlieren.
- Lehmann, M., Meyer, M., Kaiser, N., & Ott, W. (2017). *Umstieg von fossilen auf erneuerbare Energieträger beim Heizungersatz*. Energieforschung Stadt Zürich (FP2.8, Vol. Bericht Nr. 37).
- Lehmann, M., Ott, W., Bade, S., Inderbitzi, L., & Rutz, M. (2015). *Nachhaltige Gebäudeerneuerung in Etappen – SANETAP*. Econcept und Meier + Steinauer Partner im Auftrag des BFE, der Kantone Basel-Stadt, Schaffhausen und Thurgau und der Stadt Zürich.
- Marte, T. (2021). *Körperschall im Griff - So werden Ihre Wärmepumpen (noch) leiser*. FWS-Fachtagung Spreitenbach.
- Mellwig, P., Pehnt, M., & Lempik, J. (2021). *Energieeffizienz als Türöffner für erneuerbare Energien im Gebäudebereich*. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Fraunhofer Fraunhofer-Institut für System- und Inno-vationsforschung, IREES GmbH.
- Muller, V., Carisch, L., & Ménard, M. (2016). *Effiziente Abluft-Erdsonden-Wärmepumpen für*

- die Gebäudeerneuerung, BFE P+D Projekt, Vertrag SI/501022-01, 2014-2016.* Retrieved from <https://www.aramis.admin.ch/Kategorien/?ProjectID=34725>
- Nägeli, C., Camarasa, C., Jakob, M., Catenazzi, G., & Ostermeyer, Y. (2018). *Synthetic building stocks as a way to assess the energy demand and greenhouse gas emissions of national building stocks.* *Energy and Buildings*, 173, 443–460. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.055>
- Nägeli, C., Farahani, A., Österbring, M., Dalenbäck, J. O., & Wallbaum, H. (2019). *A service-life cycle approach to maintenance and energy retrofit planning for building portfolios.* Elsevier Ltd. *Building and Environment*, 160. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106212>
- Nägeli, C., Jakob, M., Catenazzi, G., & Ostermeyer, Y. (2020a). *Policies to decarbonize the Swiss residential building stock: An agent-based building stock modeling assessment.* Elsevier Ltd. *Energy Policy*, 146. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2020.111814>
- Nägeli, C., Jakob, M., Catenazzi, G., & Ostermeyer, Y. (2020b). *Towards agent-based building stock modeling: Bottom-up modeling of long-term stock dynamics affecting the energy and climate impact of building stocks.* *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109763>
- Ott, W., Jakob, M., Bolliger, R., Bade, S., Karlegger, A., Jaberg, A., & Berleth, H. (2013). *Erneuerungstätigkeit und Erneuerungsmotive bei Wohn- und Bürobauten. Forschungsprojekt 2.2.4. Energieforschung Stadt Zürich – Ein ewz-Beitrag zur 2000-Watt-Gesellschaft.*
- Primas, A., Aiulfi, D., Jakob, M., Maschio, I., Dellsperger, V., Brunet, L., ... Grodofzig, F. B. (2010). *Energieverbrauch von Bürogebäuden und Grossverteilern - Erhebung des Strom- und Wärmeverbrauchs, der Verbrauchs-anteile, der Entwicklung in den letzten 10 Jahre und Identifizierung der Optimierungspotentiale.* Basler & Hofmann, Sorane, CEPE und ETH Zürich i.A. Bundesamt für Energie (BFE). Bern.
- Primas, A., Stettler, Y., Cloos, L., & Schwabe, K. (2014). *Schweizerische Holzenergiestatistik. Erhebung für das Jahr 2013.* Basler und Hofmann AG, Zürich i.A. Bundesamt für Energie.
- Prognos, TEP Energy, Infrac, & Ecoplan. (2021). *Energieperspektiven 2050+ Gesamtdokumentation der Arbeiten.* i.A. BFE.
- prSIA 384/1. (2021). *Heizungsanlagen in Gebäuden - Grundlagen und Anforderungen, überarbeiteter Vernehmlassungsentwurf.*
- Schmid, N., Haelg, L., Sewerin, S., Schmidt, T. S., & Simmen, I. (2021). *Governing complex societal problems: The impact of private on public regulation through technological change.* John Wiley & Sons, Ltd. *Regulation & Governance*, 15(3), 840–855. <https://doi.org/10.1111/REGO.12314>
- Schweizerische Eidgenossenschaft. (2017). *Botschaft zur Totalrevision des CO₂-Gesetzes nach 2020 vom 1. Dezember 2017, 17.071.*
- Swisspor. (2020). *Preisliste Hochbau.*
- Viessmann. (2011). *Planungshandbuch Wärmepumpen.* Allendorf (Eder)

11 Anhang

11.1 Anhang 1: Detaillierergebnisse zu Kostenkennwerten

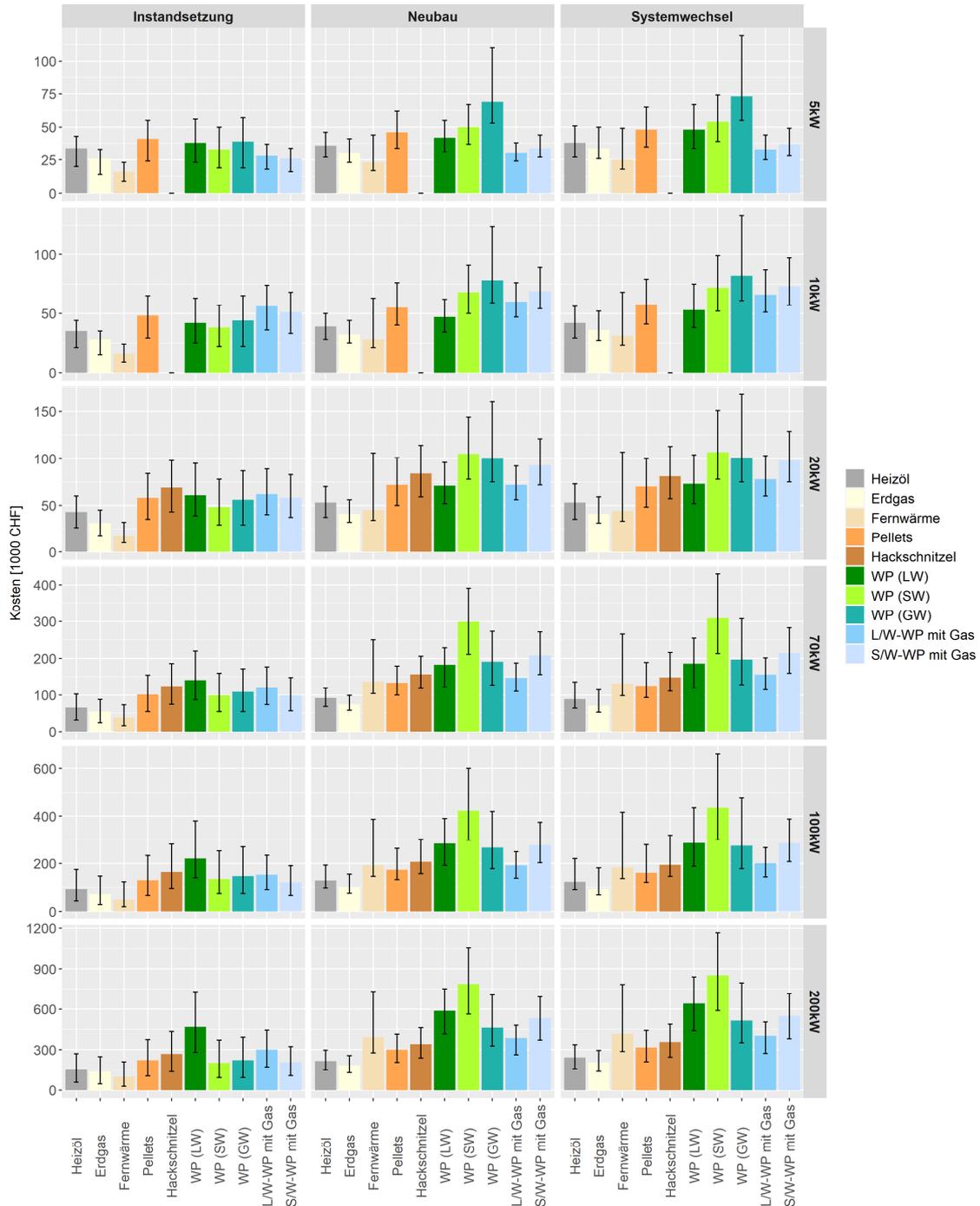


Abbildung 47: Neu erhobene Investitionskosten nach Heizsystem für verschiedene Leistungsklassen und für die Fälle "Instandsetzung", "Neubau" und "Systemwechsel". Der Fehlerbalken weist auf die Streuung (y_{\min} = günstiger Fall, y_{\max} = aufwändiger Fall) rund um den mittleren Fall (farbiger Balken) hin.

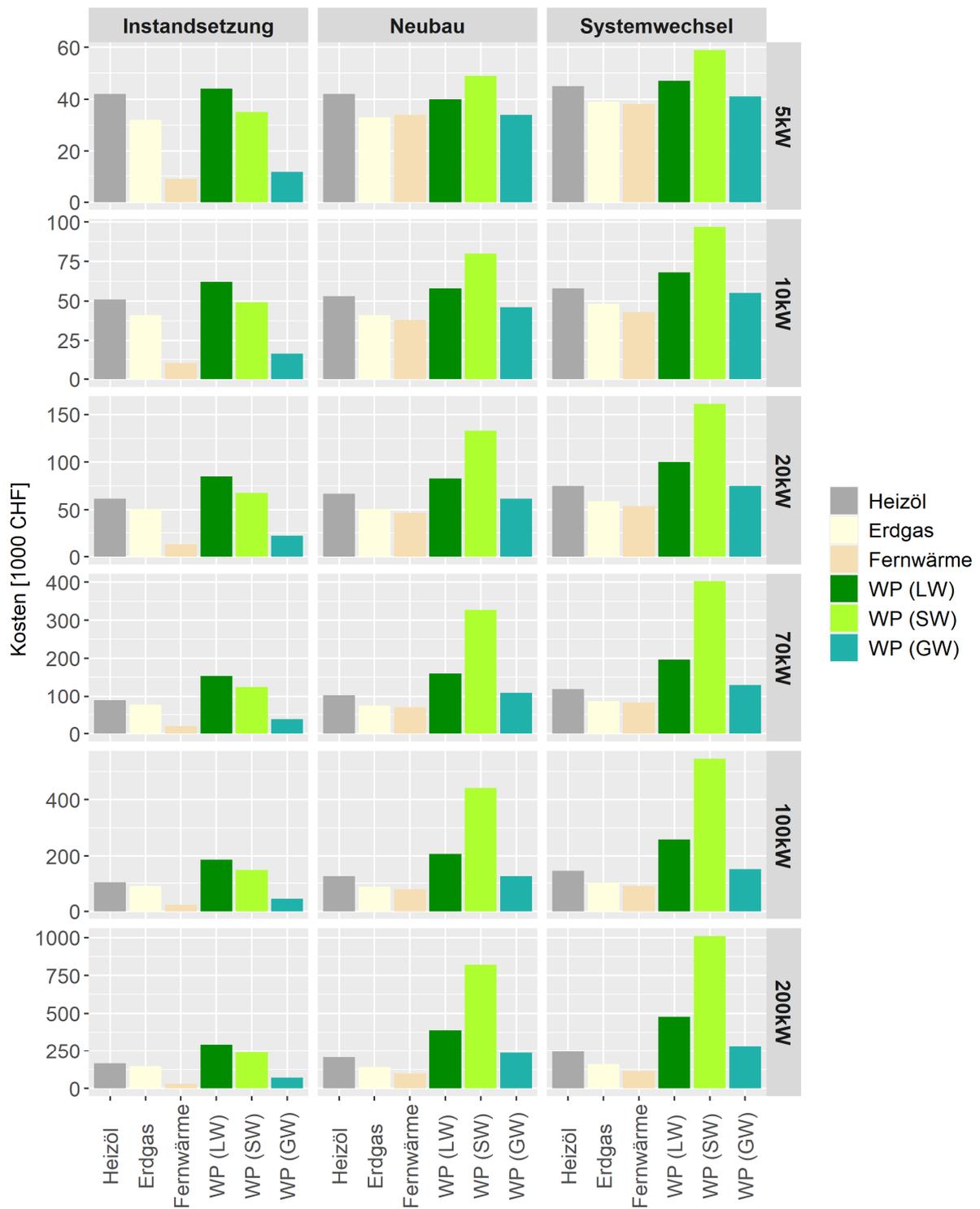


Abbildung 48: Bisher verwendete Investitionskosten nach Heizsystem für verschiedene Leistungsklassen und für die Fälle "Instandsetzung", "Neubau" und "Systemwechsel". Zum Vergleich: siehe Abbildung 47.

11.2 Anhang 2.1: Detailergebnisse Kap. 7.1

11.2.1 Statistische Modell zur Schätzung der Eignungswahrscheinlichkeit für eine Luft/Wasser-WP

Nachfolgend sind die Ergebnisse des statistischen Modells zur Schätzung der Eignungswahrscheinlichkeit für eine Luft/Wasser-WP für die drei Varianten mit unterschiedlichen Distanzanforderungen (gemäss Definition in Kap. 7.1.2) dargestellt. Für die kategoriellen Variablen ist jeweils ein Basis- bzw. Referenzattribut festzulegen, vorliegend wie folgt:

- Harmonisierte Bauzone: Wohnzone
- Gebäudetyp: Mehrfamilienhaus (MFH)

Die Variable Energiekennzahl beschreibt den spezifischen Energiebedarf ($\text{kWh} / \text{m}^2 \text{ EBF}$) und die Variable Dichte die Überbauungsdichte ($\text{m}^2 \text{ EBF} / \text{m}^2 \text{ Siedlungsfläche}$).

Der Schätzkoeffizient (estimate) ist für diese Referenzattribute jeweils per Definition gleich 0, die Chancenverhältnisse (Odds-Ratio (OR)) gleich 1.

Die Schätzergebnisse lassen sich am besten durch die Betrachtung des Odds-Ratio (OR), also des Chancenverhältnisses, interpretieren. Beispielsweise ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Luft/Wasser-WP möglich ist, für ein EFH deutlich höher als für ein MFH und für ein MFH höher als für NWG (alle übrigen Attribute gleich annehmend). Konkret ist die Chance, dass eine L/W-WP möglich ist, bei den EFH um den Faktor 3.288 höher als bei den MFH (siehe Tabelle 43). Demgegenüber sind für eine L/W-WP bei NWG tiefer (um den Faktor 0.647) und sie nehmen mit steigender Energiekennzahl ab, konkret um ca. 2%, wenn die Energiekennzahl um eine Einheit (d.h. $1 \text{ kWh} / \text{m}^2 \text{ EBF}$) erhöht wird. Der Intercept steigt an, je kleiner die Abstände zwischen WP und Gebäuden sein dürfen (vergleiche Variante 1,2,3 in Tabelle 43, Tabelle 44 und Tabelle 45). Dies zeigt die Tatsache, dass bei kleineren Abständen (unabhängig der im Modell verwendeten Variablen) deutlich öfters eine L/W-WP möglich ist und widerspiegelt damit die Resultate aus Kap. 7.1.

Tabelle 43 Resultate Logit Variante 1

	estimate	std.error	statistic	p.value	sign	OR
(intercept)	1.854	0.022	82.620	0.000	***	6.383
EFH	1.190	0.015	81.773	0.000	***	3.288
NWG	-0.435	0.041	-10.615	0.000	***	0.647
Energie- kennzahl	-0.019	0.000	-132.811	0.000	***	0.981
andere Bauzonen	1.232	0.015	81.475	0.000	***	3.427
Dichte	-2.298	0.033	-70.170	0.000	***	0.100

Tabelle 44 Resultate Logit Variante 2

	estimate	std.error	statistic	p.value	sign	OR
(intercept)	3.444	0.029	120.510	0.000	***	31.320
EFH	1.801	0.021	85.111	0.000	***	6.054
NWG	-1.067	0.038	-28.054	0.000	***	0.344
Energie- kennzahl	-0.015	0.000	-76.174	0.000	***	0.985
andere Bauzonen	0.464	0.019	24.318	0.000	***	1.590
Dichte	-2.226	0.028	-80.637	0.000	***	0.108

Tabelle 45 Resultate Logit Variante 3

	estimate	std.error	statistic	p.value	sign	OR
(intercept)	4.661	0.042	111.049	0.000	***	105.781
EFH	1.934	0.042	46.320	0.000	***	6.914
NWG	-1.741	0.039	-44.181	0.000	***	0.175
Energie- kennzahl	-0.011	0.000	-39.388	0.000	***	0.989
andere Bauzonen	-0.302	0.028	-10.826	0.000	***	0.739
Dichte	-1.620	0.020	-79.105	0.000	***	0.198

11.2.2 Strukturierung des Gebäudeparks nach Gebäudetypen und Lärmschutzaspekten

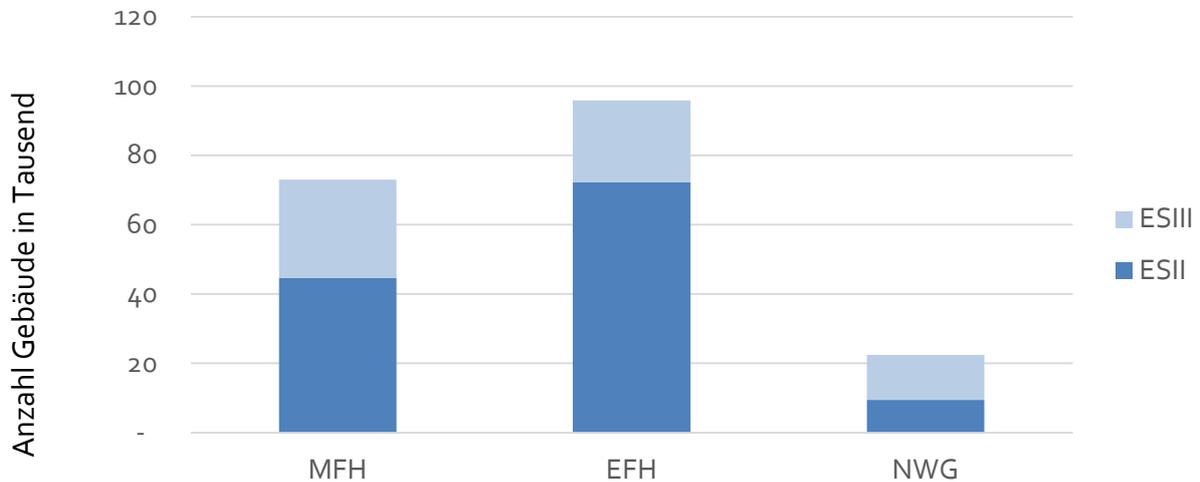


Abbildung 49: Anzahl Gebäude in Tausend nach Mehrfamilienhaus (MFH), Einfamilienhaus (EFH) und Nicht-Wohngebäude (NWG) und nach Empfindlichkeitsstufen (ES) II und III im Kanton Zürich.

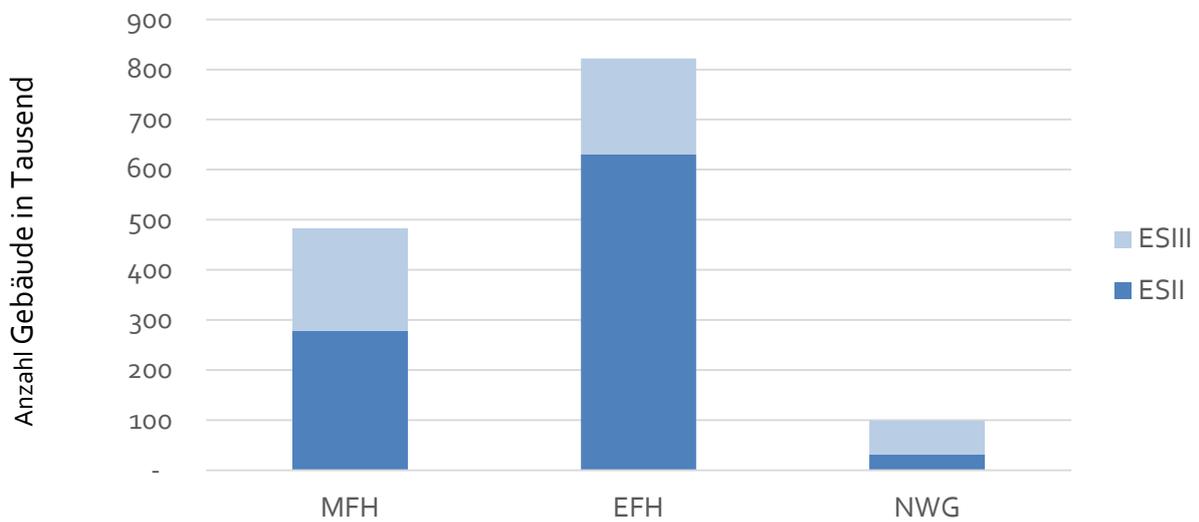


Abbildung 50: Anzahl Gebäude in Tausend nach Mehrfamilienhaus (MFH), Einfamilienhaus (EFH) und Nicht-Wohngebäude (NWG) und nach Empfindlichkeitsstufen (ES) II und III in der gesamten Schweiz.

11.2.3 Auswertung WP-Eignung nach Empfindlichkeitsstufen

Die Unterschiede je nach Variante, Gebäudetyp und Empfindlichkeitsstufe (ES) sind für die gesamte Schweiz in Abbildung 51 aufgeführt. Insbesondere bei den MFH und EFH zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen der Variante 1 und den beiden anderen Varianten. Bei den Gebäuden in der ESIII sind die Unterschiede zwischen den Varianten aufgrund der entsprechend geringeren Abstandsunterschiede etwas kleiner.

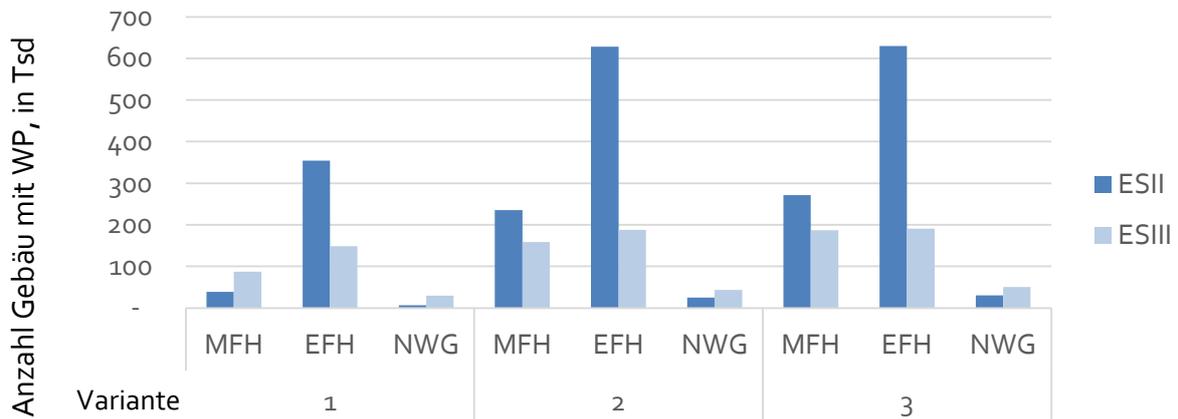


Abbildung 51: Anzahl Gebäude mit WP für die Varianten 1 – 3 nach Mehrfamilienhaus (MFH), Einfamilienhaus (EFH) und Nicht-Wohngebäude (NWG) und nach Empfindlichkeitsstufen (ES) II und III für die gesamte Schweiz.

Der EBF-bezogene Anteil ohne bzw. mit Luft/Wasser-WP nimmt von Variante zu Variante ab bzw. zu (siehe Abbildung 52). Besonders gross ist der Unterschied zwischen der Variante 1 (strenge Lärmschutz- bzw. Abstandsanforderungen) und den übrigen beiden Varianten. Bei der ESIII ist der Anteil der EBF ohne WP-Eignung trotz weniger strenger Anforderung deshalb höher, weil in diesen Zonen besonders viel NWG mit hohem Leistungsbedarf stehen.

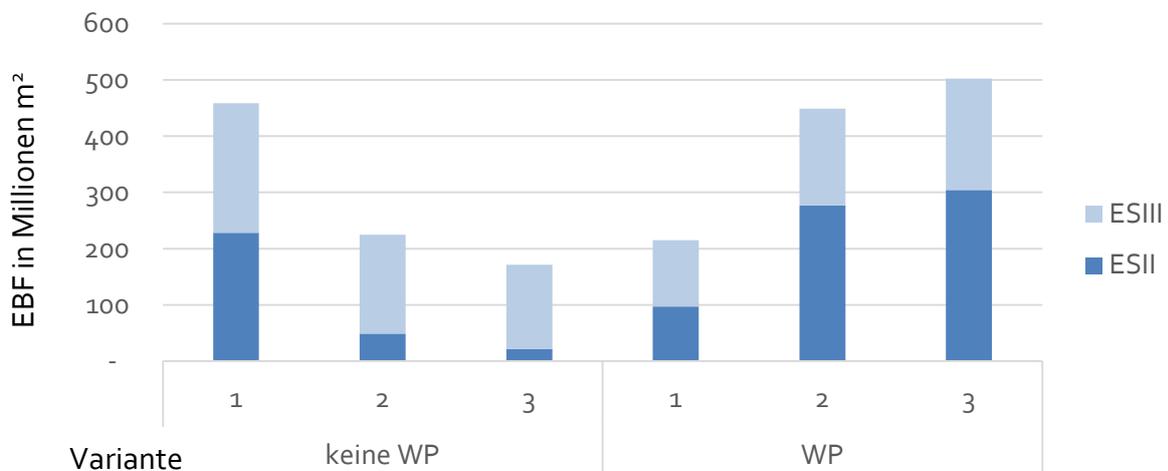


Abbildung 52: EBF der Gebäude ohne und mit WP für die Varianten 1 – 3 nach Empfindlichkeitsstufen (ES) II und III für die gesamte Schweiz.

11.3 Anhang 2.2: Detailergebnisse Kap. 7.2

Entwicklung der Heizsysteme

Tabelle 46 Entwicklung der Endenergie für Raumwärme (ohne Warmwasser) pro Heizsystem in TJ (oben) und in % (unten) für Wohngebäude für die sechs Modellläufe (Definition Modellläufe siehe Tabelle 34)

	ML1: Referenz				ML2: Neuberechnung Leistung				ML3: Aktualisierung Kosten				ML4: Anforderung 6 kg CO ₂ /m ²				ML5: Inkl. bivalente LICS				ML6: Effekt leise WP			
	2000	2020	2035	2050	2000	2020	2035	2050	2000	2020	2035	2050	2000	2020	2035	2050	2000	2020	2035	2050	2000	2020	2035	2050
Heizöl	98.6	55.5	41.8	33.4	98.5	53.1	39.7	31.4	98.5	56.5	43.7	34.7	98.5	54.8	21.2	6.8	98.5	54.9	21.2	6.8	98.5	54.9	21.2	6.7
Erdgas	26.6	26.2	28.7	28.3	26.5	26.0	28.5	28.2	26.5	25.8	28.2	28.1	26.5	25.0	18.0	13.1	26.5	25.0	17.7	12.7	26.5	25.0	17.5	12.4
Holz total	17.8	14.9	12.5	10.3	17.7	15.0	12.5	10.3	17.7	13.5	11.0	8.9	17.7	15.9	21.4	20.9	17.7	15.9	20.7	19.9	17.7	15.9	20.2	19.2
Fernwärme	2.6	3.7	4.6	4.6	2.6	3.6	4.5	4.5	2.5	3.0	3.6	3.6	2.5	3.1	5.2	5.7	2.5	3.1	5.1	5.6	2.5	3.1	5.1	5.6
WP (SW)	3.9	5.9	5.1	4.4	3.9	7.7	6.5	5.6	4.0	9.1	8.2	7.3	4.0	9.2	12.8	13.8	4.0	9.2	11.2	11.6	4.0	9.2	10.8	11.1
WP (LW)	4.8	13.4	14.8	14.7	4.8	13.3	15.0	15.2	4.8	11.4	13.1	13.7	4.8	11.6	25.8	30.3	4.8	11.6	22.5	26.1	4.8	11.7	23.5	27.4
WP (GW)	0.4	0.3	0.8	1.3	0.4	0.3	0.8	1.3	0.4	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.6	0.9	0.4	0.2	0.6	0.8	0.4	0.2	0.6	0.8
Elektro	3.2	0.8	0.2	0.3	3.2	0.8	0.2	0.3	3.2	0.9	0.4	0.4	3.2	0.9	0.5	0.5	3.2	0.9	0.5	0.5	3.2	0.9	0.5	0.5
Biogas	0.5	0.2	0.1	0.2	0.5	0.2	0.1	0.2	0.5	0.2	0.3	0.5	0.5	0.3	4.0	6.2	0.5	0.3	3.0	4.9	0.5	0.3	2.8	4.6
Nahwärme	3.4	4.6	4.6	3.9	3.4	4.5	4.6	3.8	3.4	3.9	3.6	3.0	3.4	3.9	3.1	2.1	3.4	3.7	3.1	2.2	3.4	3.7	3.1	2.2
S/W-WP biv.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.5	3.5	-	-	2.3	3.2
L/W-WP biv.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.3	5.8	-	-	4.7	6.3
Total	162	126	114	102	162	125	113	101	162	125	113	101	162	125	113	101	162	125	113	100	162	125	112	100
	ML1: Referenz				ML2: Neuberechnung Leistung				ML3: Aktualisierung Kosten				ML4: Anforderung 6 kg CO ₂ /m ²				ML5: Inkl. bivalente LICS				ML6: Effekt leise WP			
	2000	2020	2035	2050	2000	2020	2035	2050	2000	2020	2035	2050	2000	2020	2035	2050	2000	2020	2035	2050	2000	2020	2035	2050
Heizöl	61%	44%	37%	33%	61%	43%	35%	31%	61%	45%	39%	34%	61%	44%	19%	7%	61%	44%	19%	7%	61%	44%	19%	7%
Erdgas	16%	21%	25%	28%	16%	21%	25%	28%	16%	21%	25%	28%	16%	20%	16%	13%	16%	20%	16%	13%	16%	20%	16%	12%
Holz total	11%	12%	11%	10%	11%	12%	11%	10%	11%	11%	10%	9%	11%	13%	19%	21%	11%	13%	18%	20%	11%	13%	18%	19%
Fernwärme	2%	3%	4%	5%	2%	3%	4%	5%	2%	2%	3%	4%	2%	2%	5%	6%	2%	2%	5%	6%	2%	2%	5%	6%
WP (SW)	2%	5%	4%	4%	2%	6%	6%	5%	2%	7%	7%	7%	2%	7%	11%	14%	2%	7%	10%	12%	2%	7%	10%	11%
WP (LW)	3%	11%	13%	15%	3%	11%	13%	15%	3%	9%	12%	14%	3%	9%	23%	30%	3%	9%	20%	26%	3%	9%	21%	27%
WP (GW)	0%	0%	1%	1%	0%	0%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	1%
Elektro	2%	1%	0%	0%	2%	1%	0%	0%	2%	1%	0%	0%	2%	1%	0%	0%	2%	1%	0%	0%	2%	1%	0%	0%
Biogas	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4%	6%	0%	0%	3%	5%	0%	0%	3%	5%
Nahwärme	2%	4%	4%	4%	2%	4%	4%	4%	2%	3%	3%	3%	2%	3%	3%	2%	2%	3%	3%	2%	2%	3%	3%	2%
S/W-WP biv.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2%	3%	-	-	2%	3%
L/W-WP biv.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4%	6%	-	-	4%	6%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Quelle: Modellrechnungen mit dem GPM von TEP Energy, dieses Projekt

Tabelle 47 Entwicklung der Endenergie für Raumwärme (RW) (ohne Warmwasser) für die Heizsysteme Öl und Gas sowie das Total aller Heizsysteme für verschiedene Gebäudesegmente für die sechs Modellläufe (Definition Modellläufe siehe Tabelle 34). WG: Wohngebäude, GT: Gebäudetypen)

		ML1: Referenz			ML2: Neuberechn. Leistung			ML3: Aktualisierung Kosten			ML4: Anforderung 6 kg CO ₂ /m ²			ML5: Inkl. bivalente LICS			ML6: Effekt leise WP		
		2020-2000	2035-2020	2050-2035	2020-2000	2035-2020	2050-2035	2020-2000	2035-2020	2050-2035	2020-2000	2035-2020	2050-2035	2020-2000	2035-2020	2050-2035	2020-2000	2035-2020	2050-2035
EFH	Öl	-54%	-28%	-20%	-59%	-29%	-20%	-57%	-28%	-21%	-57%	-71%	-68%	-57%	-71%	-68%	-57%	-71%	-68%
	Gas	-34%	28%	3%	-35%	27%	4%	-34%	17%	2%	-37%	-49%	-39%	-37%	-50%	-41%	-37%	-50%	-42%
	Total RW	-27%	-12%	-11%	-27%	-12%	-11%	-27%	-12%	-11%	-27%	-13%	-11%	-27%	-13%	-12%	-27%	-13%	-12%
MFH	Öl	-37%	-23%	-20%	-38%	-24%	-21%	-34%	-20%	-20%	-37%	-58%	-69%	-36%	-58%	-69%	-36%	-58%	-69%
	Gas	15%	3%	-3%	16%	4%	-2%	14%	6%	-1%	11%	-24%	-26%	11%	-25%	-27%	11%	-26%	-28%
	Total RW	-19%	-8%	-10%	-19%	-8%	-10%	-20%	-8%	-10%	-19%	-8%	-10%	-19%	-8%	-10%	-19%	-8%	-10%
Total WG	Öl	-44%	-25%	-20%	-46%	-25%	-21%	-43%	-23%	-21%	-44%	-61%	-68%	-44%	-61%	-68%	-44%	-61%	-68%
	Gas	-2%	10%	-1%	-2%	10%	-1%	-2%	9%	0%	-6%	-28%	-27%	-5%	-29%	-28%	-6%	-30%	-29%
	Total RW	-22%	-10%	-11%	-23%	-10%	-10%	-23%	-10%	-11%	-23%	-10%	-11%	-23%	-10%	-11%	-23%	-10%	-11%
DL-Sektor	Öl	-33%	-26%	-25%	-33%	-27%	-28%	-25%	-14%	-17%	-28%	-54%	-68%	-28%	-54%	-68%	-28%	-54%	-68%
	Gas	12%	-8%	-8%	12%	-9%	-7%	17%	-1%	-1%	14%	-35%	-46%	14%	-35%	-46%	14%	-35%	-47%
	Total RW	-12%	-9%	-8%	-12%	-9%	-8%	-12%	-9%	-8%	-12%	-6%	-7%	-12%	-6%	-7%	-12%	-6%	-7%
Total alle GT	Öl	-39%	-25%	-22%	-41%	-26%	-23%	-36%	-19%	-19%	-38%	-58%	-68%	-38%	-58%	-68%	-38%	-58%	-68%
	Gas	4%	1%	-4%	4%	1%	-3%	5%	4%	0%	2%	-31%	-35%	2%	-32%	-36%	2%	-32%	-37%
	Total RW	-19%	-9%	-9%	-19%	-9%	-9%	-19%	-9%	-9%	-19%	-8%	-9%	-19%	-6%	-8%	-19%	-6%	-8%

Quelle: Modellrechnungen mit dem GPM von TEP Energy, dieses Projekt

Tabelle 48 Entwicklung der direkten CO₂-Emissionen der Energieträger Öl und Gas sowie des Total für verschiedene Gebäudesegmente für die sechs Modellläufe (Definition Modellläufe siehe Tabelle 34). WG: Wohngebäude, GT: Gebäudetypen)

		ML1: Referenz			ML2: Neuberechn. Leistung			ML3: Aktualisierung Kosten			ML4: Anforderung 6 kg CO ₂ /m ²			ML5: Inkl. bivalente LICS			ML6: Effekt leise WP		
		2020- 2000	2035- 2020	2050- 2035	2020- 2000	2035- 2020	2050- 2035	2020- 2000	2035- 2020	2050- 2035	2020- 2000	2035- 2020	2050- 2035	2020- 2000	2035- 2020	2050- 2035	2020- 2000	2035- 2020	2050- 2035
EFH	Öl	-53%	-29%	-20%	-57%	-30%	-20%	-55%	-30%	-21%	-55%	-70%	-66%	-56%	-69%	-63%	-56%	-69%	-63%
	Gas	-44%	14%	2%	-44%	13%	2%	-45%	6%	0%	-47%	-50%	-38%	-47%	-45%	-34%	-47%	-45%	-35%
	Total RW	-51%	-20%	-13%	-55%	-21%	-13%	-53%	-22%	-15%	-54%	-66%	-58%	-54%	-64%	-54%	-54%	-64%	-54%
MFH	Öl	-36%	-27%	-22%	-37%	-28%	-23%	-33%	-24%	-22%	-35%	-58%	-68%	-35%	-58%	-67%	-35%	-58%	-67%
	Gas	-8%	-1%	-4%	-8%	-1%	-4%	-9%	0%	-2%	-12%	-28%	-25%	-12%	-26%	-25%	-12%	-27%	-26%
	Total RW	-31%	-21%	-16%	-31%	-21%	-16%	-28%	-18%	-16%	-31%	-51%	-53%	-31%	-50%	-52%	-31%	-51%	-52%
Total WG	Öl	-42%	-28%	-21%	-44%	-29%	-22%	-40%	-25%	-22%	-42%	-61%	-67%	-42%	-61%	-65%	-42%	-61%	-65%
	Gas	-19%	4%	-3%	-19%	4%	-3%	-21%	3%	-2%	-23%	-30%	-26%	-23%	-28%	-25%	-23%	-29%	-26%
	Total RW	-38%	-20%	-15%	-39%	-21%	-16%	-37%	-19%	-16%	-38%	-54%	-52%	-39%	-53%	-51%	-39%	-53%	-51%
DL- Sektor	Öl	-35%	-31%	-27%	-36%	-32%	-29%	-28%	-19%	-18%	-31%	-56%	-68%	-31%	-56%	-67%	-31%	-55%	-67%
	Gas	-12%	-12%	-8%	-13%	-12%	-8%	-10%	-6%	-2%	-12%	-36%	-45%	-13%	-35%	-42%	-13%	-35%	-42%
	Total RW	-30%	-25%	-20%	-30%	-26%	-22%	-24%	-16%	-14%	-27%	-50%	-60%	-27%	-50%	-58%	-27%	-50%	-58%
Total alle GT	Öl	-39%	-28%	-23%	-41%	-29%	-24%	-36%	-22%	-20%	-38%	-59%	-67%	-38%	-58%	-66%	-38%	-58%	-66%
	Gas	-17%	-2%	-5%	-17%	-2%	-4%	-17%	-1%	-2%	-19%	-32%	-33%	-19%	-31%	-31%	-19%	-31%	-32%
	Total RW	-35%	-21%	-17%	-36%	-22%	-17%	-32%	-17%	-14%	-34%	-52%	-55%	-34%	-51%	-53%	-34%	-52%	-54%

Quelle: Modellrechnungen mit dem GPM von TEP Energy, dieses Projekt



Abbildung 53: Annualisierte Investitionskosten (Mio. CHF / Jahr) in Heizsysteme für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser für alle Gebäudetypen, Modellläufe 1 bis 6 (Definition Modellläufe siehe Tabelle 34)

Entwicklung auf Ebene Primärenergie

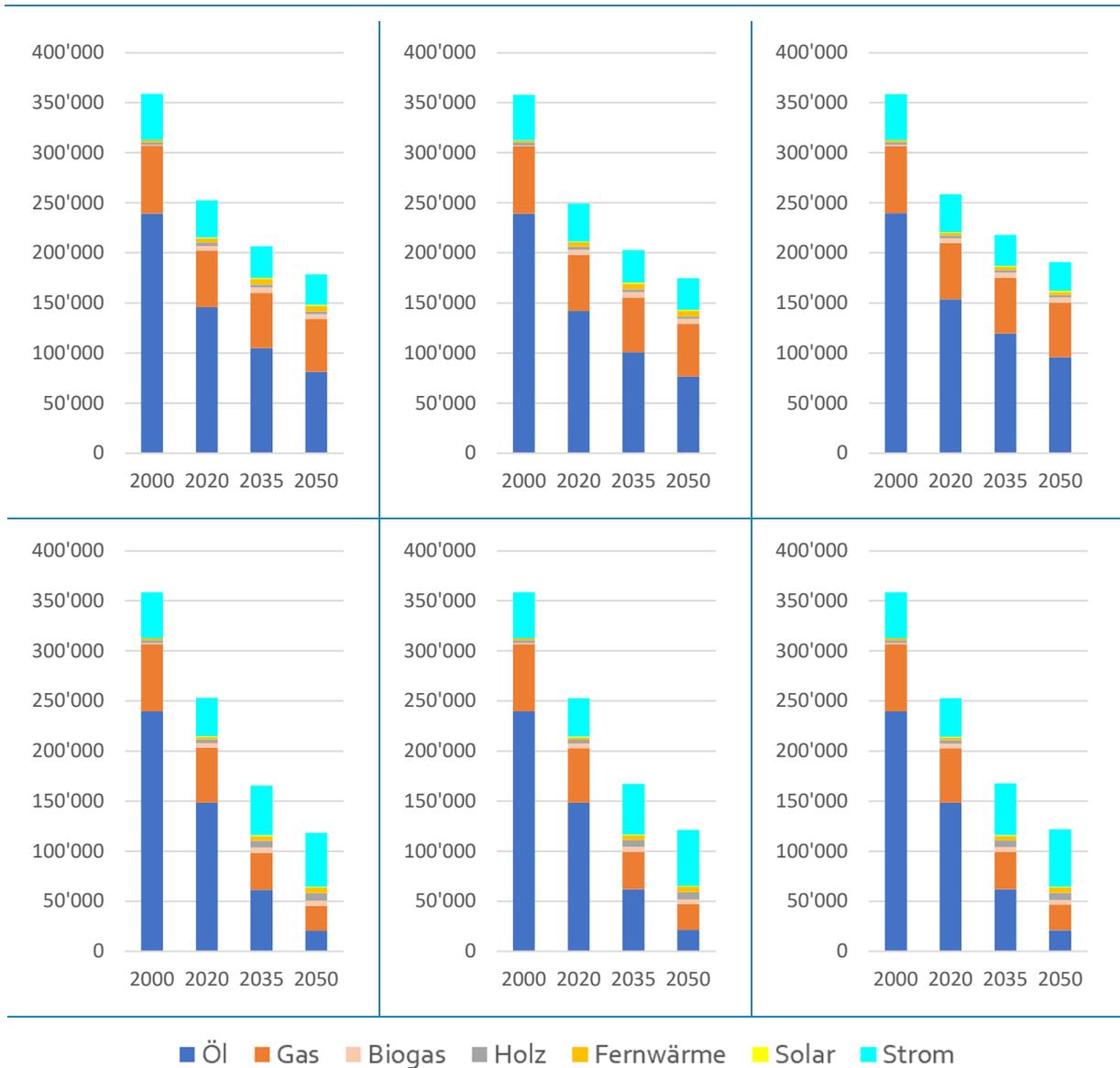


Abbildung 54: Entwicklung des Primärenergiebedarfs (PJ) aller Gebäudetypen aus der Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser Modellläufe 1 bis 6 (Definition Modellläufe siehe Tabelle 34)