



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
SEKTION Erneuerbare Energien

Bericht vom 30. November 2019

Ausblick auf mögliche Entwicklungen von Wärmepumpen-Anlagen bis 2050



Datum: 29. November 2019

Ort: Buchs SG

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs
Werdenbergstrasse 4, 9471 Buchs
www.ntb.ch

Autor/in:

Manuel Prinzing, NTB, manuel.prinzing@ntb.ch
Matthias Berthold, NTB, matthias.berthold@ntb.ch
Stefan Bertsch, NTB, stefan.bertsch@ntb.ch

BFE-Bereichsleitung: Rita Kobler, rita.kobler@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/402837-01

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
MANAGEMENT SUMMARY	5
RÉSUMÉ	8
ABSTRACT	11
Abkürzungsverzeichnis	12
1 Generelle Aussagen zu Effizienz, Entwicklungen und Erwartungen	13
1.1 Kältemittel	13
1.2 Warmwasser und Legionellen.....	13
1.3 Neue Energiequellen	14
1.4 Solarstromnutzung und SmartGrid	15
1.5 Kühlen mit Wärmepumpen	16
1.6 Gaswärmepumpe (Ad- und Absorption und Gasmotor)	16
1.7 Hybrid Wärmepumpe und bivalente Systeme	17
1.8 Mehrfamilienhäuser	18
1.9 Entwicklungstrends	18
1.10 Politische und gesetzliche Rahmenbedingungen	19
1.11 Quantitatives Betrachtungsmodell	20
2 Prognose JAZ Entwicklung von Elektrowärmepumpen	22
2.1 Systemgrenze	22
2.2 Methodik zur Bestimmung derzeitiger JAZ-Werte	22
2.3 Effizienzzahlen Feldmessung Heizen und Trinkwarmwasser	24
2.4 Effizienz beim Kühlen	25
2.5 Ermittlung WNG aus JAZ	25
2.6 Methodik Forecast bis 2050	26
2.7 Effizienzzahlen 2050	27
3 FAZIT	29
Literaturverzeichnis	30
Anhang	32

MANAGEMENT SUMMARY

THEMATIK:

Das Bundesamt für Energie möchte die Energieperspektiven bis 2050 aktualisieren. Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Wärmepumpen im Gebäudesektor ist eine detaillierte Betrachtung der zukünftigen Effizienzentwicklung der Wärmepumpentechnologie nötig. Dieser Bericht betrachtet die involvierten Themenbereiche und zeigt die Einflussgrössen auf die Effizienzentwicklung auf. Im Gegensatz zu Hochrechnungen von Labormesswerten oder Simulationen ist diese Prognose aus real gemessenen Betriebswerten von Wärmepumpen-Feldanlagen, die in die Kategorien «Neubau», «Sanierung» und «Altbau» gemäss ihrer Vorlauftemperatur im Auslegepunkt eingeteilt sind, aufgebaut. Für den Forecast bis 2050 wird eine vereinfachte lineare Hochrechnung unter Berücksichtigung des Gütegrades mit verschiedenen Szenarien verwendet. Ein beigegefügtes Excel-Rechentool ermöglicht dabei die Anpassung der Szenarien, falls in Zukunft neue Informationen zur Verfügung stehen. Auch können die Basisdaten auf zukünftig breiter abgedeckte Messwerte aus den Feldmessungen abgestützt werden. Obwohl die möglichen Einflussgrössen auf die zukünftige Effizienz von Wärmepumpenanlagen sehr vielfältig und nicht vollständig vorhersehbar sind, können selbst im konservativsten Szenario deutliche Effizienzsteigerungen gegenüber der heutigen Technik prognostiziert werden. Neben dieser quantitativen Analyse für Elektro-Wärmepumpen wurde auch eine qualitative Analyse verschiedenster Entwicklungstrends untersucht.

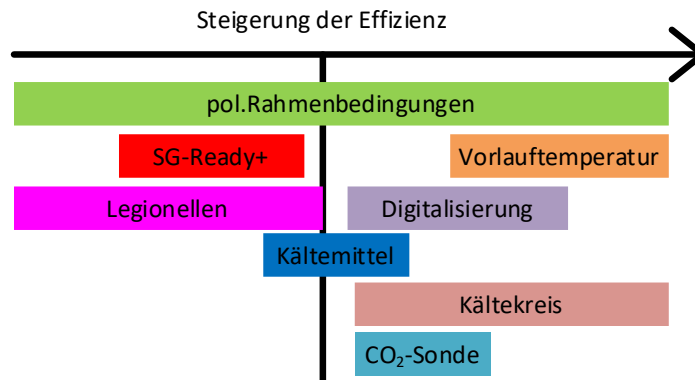
METHODE:

Dieser Bericht ist unterteilt in die qualitative Analyse durch Literaturrecherche und in eine quantitative Bewertung aus den Feldmessdaten. Für die Recherche wurden diverse Themenbereiche der Wärmepumpentechnik, Wärmequellen sowie Entwicklungstrends und Rahmenbedingungen betrachtet. Für die Datenauswertung und Verarbeitung werden die JAZ Werte der Kleinwärmepumpen, aufgeteilt nach LW- und SW-Wärmepumpen mit den Messdaten der Heizsaisons 2017/18 und 2018/19, bestimmt. Für LW-Wärmepumpen können 9 Objekte mit insgesamt 15 Messsaisons und für SW-Wärmepumpen 7 Objekte mit 13 Saisons ausgewertet werden. Im ersten Schritt wird die individuelle Vorlauftemperatur im Auslegepunkt der Anlage bestimmt und es erfolgt eine Einteilung in die Gruppen «Neubau», «Sanierung» und «Altbau». Anschliessend erfolgt die Berechnung der jetzigen Gütegrade der Wärmepumpenanlagen aus den gemessenen Betriebsdaten. Für den Forecast bis 2050 werden drei mögliche Effizienzszenerarien angenommen und die Effizienzverbesserung bis 2050 vereinfacht linear hochgerechnet, da die Umsetzungsgeschwindigkeit verschiedener Massnahmen vor allem von den politischen Rahmenbedingungen vorgegeben wird. Für die Beurteilung von Grosswärmepumpen wurden die Effizienzzahlen von Kleinwärmepumpen verwendet, da einerseits nicht ausreichend Feldmessdaten vorhanden sind und andererseits die Labormessungen am WPZ und die BAFA-Liste gezeigt haben, dass keine signifikanten Effizienzunterschiede in der Wärmebereitstellung bei unterschiedlichen Leistungen vorhanden sind.

ERGEBNIS:

Aus der Literaturrecherche geht der eindeutige und grosse Einfluss der politischen Rahmenbedingungen hervor, welche die zukünftige Steigerung der Effizienz von Wärmepumpen-Anlagen sowohl positiv

als auch negativ beeinflusst werden kann. Währenddessen kann durch die aktuelle Thematik der neuen Kältemittel ohne eine deutliche Verbesserung des Kältekreislaufes kein Effizienzsprung erwartet werden. Die Einflussmöglichkeiten der einzelnen Themenbereiche sind in der folgenden Abbildung zusammengefasst:



Quantitative Analyse der Haupteinflussparameter auf die Wärmepumpen Effizienz

Das Hauptergebnis der quantitativen Effizienz-Analyse aus den Feldmessdaten ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst. LW-Wärmepumpen erreichen derzeit im Neubau für Einfamilienhäuser den Betriebsmodus Heizen und Trinkwarmwasser eine gemessene Jahresarbeitszahl von 3.5, SW-Wärmepumpen eine JAZ von 4.9. Unter Annahme des Best-Case Szenario sind bis 2050 Jahresarbeitszahlen von 6.8 bzw. 8.6 möglich. Die Werte repräsentieren neu installierte Wärmepumpen-Anlagen. Sie spiegeln nicht den schweizerischen Gesamtbestand inkl. älterer Wärmepumpen im Feld dar.

Übersicht der Messwerte und Effizienzentwicklung im Best-Case Szenario für 2050

Best-Case (0.65)

WP-Typ	2018			2050 Rechnung mit $\eta = 0.65$		
	JAZ Heizen [-]	JAZ TWW [-]	JAZ Heizen & TWW [-]	JAZ Heizen [-]	JAZ TWW [-]	JAZ Heizen & TWW [-]
	Vorlauftemperatur im			NEUBAU mit 35-30 °C		
LW	3.7	2.8	3.5	7.0	5.3	6.8
SW	5.7	3.2	4.9	9.1	5.1	8.6
	Vorlauftemperatur im			SANIERUNG mit 45-40 °C		
LW	3.3	2.8	3.1	5.6	5.3	5.6
SW	5.0	3.2	4.6	7.2	5.1	6.5
	Vorlauftemperatur im			ALTBAU mit 55-50 °C		
LW	2.9	2.8	2.8	5.0	5.3	4.9
SW	4.4	3.2	4.3	5.3	5.1	5.2

FAZIT:

Basierend auf den Feldmessungen vom BFE und den daraus abgeleiteten Berechnungen wurde eine Prognosemöglichkeit für die Effizienzentwicklung von Wärmepumpen erstellt. Die politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen sind hauptentscheidend, können heute aber nur begrenzt vorhergesagt werden. Auf technischer Seite ist noch signifikantes Potential für weitere Effizienzverbesserungen vorhanden. Die Entwicklung der durchschnittlich erzielten Arbeitszahlen im Feld könnte aber erst noch sinken, wenn vermehrt Objekte mit höherer Vorlauftemperatur durch Wärmepumpen-Anlagen umgerüstet werden. Dieser Effekt kann über die Gewichtung der Szenarien für «Neubau», «Sanierung» und «Altbau» abgedeckt werden.

RÉSUMÉ

THÉMATIQUE:

L'Office Fédéral de l'Énergie souhaite mettre à jour les perspectives énergétiques à l'an 2050. Pour ce faire, et au vu de l'utilisation toujours croissante des pompes à chaleur dans les bâtiments, il s'est avéré nécessaire de faire une étude détaillée de l'évolution de l'efficacité des pompes à chaleur. Dans le présent rapport, les différents éléments qui influencent l'évolution de l'efficacité, ainsi que la manière dont ils l'influencent, ont été analysés. Les analyses, et les prévisions qui en découlent, ne sont pas tirées d'extrapolations de valeurs mesurées en laboratoire ou de simulations, mais au contraire de valeurs opérationnelles réelles, mesurées sur des installations concrètes. Ces installations ont été catégorisées dans les trois groupes suivants, en fonction de la température « aller » (température en sortie de condenseur), telle que définie dans la phase de dimensionnement de l'installation : « Construction neuve », « Rénovation » et « Construction ancienne ». Pour déterminer la prévision à l'an 2050, on a procédé à une simple extrapolation linéaire, en tenant compte du rendement exergetique¹ en fonction de différents scénarios. Un calculateur Excel est joint, permettant d'adapter les scénarios en fonction des nouvelles informations qui pourraient devenir disponibles à l'avenir. En outre, les informations qui servent de base proviendront à l'avenir également d'un nombre plus important de valeurs de mesures. Même si les paramètres influençant l'efficacité des installations comprenant des pompes à chaleur sont nombreux, et pas forcément toujours prévisibles, on peut néanmoins, même en tenant compte de scénarios très conservateurs, prévoir des améliorations importantes de l'efficacité de ces installations (comparé aux installations actuelles). En plus des analyses quantitatives liées aux pompes à chaleur électriques elles-mêmes, des analyses qualitatives des différentes tendances influençant l'évolution de ces installations, ont également été réalisées.

MÉTHODE:

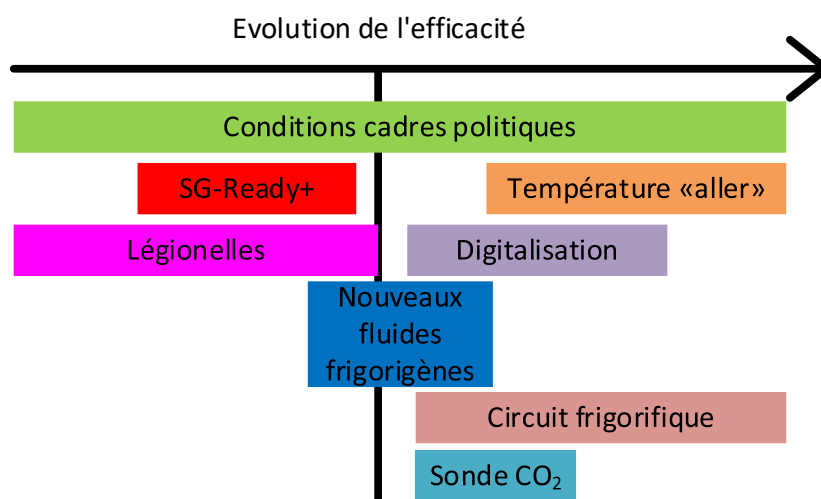
Ce rapport comprend une première partie consacrée à l'étude de la littérature, et une deuxième partie consacrée à l'analyse des valeurs mesurées. En ce qui concerne la recherche littéraire, plusieurs aspects ont été considérés, tels que la technologie liée aux pompes à chaleur, les sources de chaleur, les tendances dans les évolutions ou encore les conditions cadres (p.ex. politiques). L'analyse des valeurs mesurées a, quant à elle, permis de déterminer le coefficient de performance annuel des petites pompes à chaleur, grâce aux mesures faites durant les saisons de chauffe 2017/18 et 2018/19. A noter que les pompes à chaleur ont été subdivisées en pompes à chaleur air/eau et sol/eau. Pour les pompes à chaleur air/eau, 9 installations ont pu être mesurées pour un total de 15 sets de données. Quant aux pompes à chaleur sol/eau, 7 installations ont pu être mesurées pour un total de 13 sets de données. Dans une première étape, les installations sont catégorisées dans les trois catégories « Construction neuve », « Rénovation » et « Construction ancienne », en fonction de la température « aller » de dimensionnement de l'installation. Ensuite de ça, le rendement exergetique de l'installation est défini à l'aide des valeurs de mesure (données opérationnelles). Trois scénarios différents d'efficacité sont ensuite considérés pour déterminer l'évolution de l'efficacité à l'an 2050. Cette évolution est déterminée grâce à des extrapolations linéaires, sachant que la rapidité de mise en œuvre des différentes mesures dépendra essentiellement du cadre politique. Pour déterminer l'efficacité des grosses pompes à chaleur, on a utilisé les valeurs des petites pompes à chaleur. En effet, d'une part il n'y a pas suffisamment de

¹ Rendement exergetique : rapport entre le rendement effectif et le rendement théorique de la pompe à chaleur

mesures disponibles pour les grosses pompes à chaleur, et, d'autre part, les mesures faites en laboratoire, que ce soit au WPZ (Centre de test de Buchs) ou au BAFA (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle en Allemagne) montrent qu'il n'y a pas de différence significative en fonction de la puissance de l'installation, quant à l'efficacité lors de la production de chaleur.

RÉSULTAT:

L'étude de la littérature montre la prédominance de l'influence considérable des conditions cadres politiques, qui jouent un rôle dans l'évolution de l'efficacité des installations comprenant des pompes à chaleur, rôle qui peut être aussi bien positif que négatif. En ce qui concerne la thématique actuelle des nouveaux fluides frigorigènes, il est à noter que sans une importante amélioration du circuit frigorifique, on ne peut pas s'attendre à une augmentation notable de l'efficacité. Les domaines d'influence des différents paramètres/domaines sont résumés dans la figure ci-dessous :



Analyse quantitative des principaux domaines d'influence sur l'efficacité des pompes à chaleur

Le principal résultat des analyses quantitatives de l'efficacité, analyses issues des valeurs mesurées sur les installations existantes, est résumé dans le tableau ci-dessous. Le coefficient de performance annuel des pompes à chaleur air/eau, fournissant le chauffage et l'ECS dans des maisons individuelles, atteint actuellement une valeur de 3,5, contre 4,9 pour les pompes à chaleur sol/eau. En admettant le scénario « best case », ces valeurs peuvent monter à 6,8 respectivement 8,6. Les valeurs représentent des nouvelles installations. Elles ne représentent pas le parc global des pompes à chaleur installées en Suisse (qui inclurait également les anciennes pompes à chaleur).

Vue d'ensemble des valeurs de mesure et de l'évolution de l'efficacité pour le scénario « best case » pour 2050

Best-Case (0.65)

Type de PAC	2018			2050		
	COPa chauffage [-]	COPa ECS TWW [-]	COPa chauff. +ECS TWW [-]	COPa chauffage [-]	COPa ECS [-]	COPa chauff. +ECS [-]
	Température "aller" dans une			construction neuve avec 35-30°C		
air/eau	3,7	2,8	3,5	7,0	5,3	6,8
sol/eau	5,7	3,2	4,9	9,1	5,1	8,6
	Température "aller" dans une			rénovation avec 45-40°C		
air/eau	3,3	2,8	3,1	5,6	5,3	5,6
sol/eau	5,0	3,2	4,6	7,2	5,1	6,5
	Température "aller" dans une			construction ancienne avec 55-50°C		
air/eau	2,9	2,8	2,8	5,0	5,3	4,9
sol/eau	4,4	3,2	4,3	5,3	5,1	5,2

CONCLUSION:

Sur la base des mesures de terrain de l'OFEN, et des analyses qui en découlent, des prévisions ont pu être réalisées quant à l'évolution de l'efficacité des pompes à chaleur. Les conditions cadres politiques et sociales sont les principaux facteurs d'influence de cette évolution, mais il n'est que difficilement possible de prédire dans quelles directions elles vont évoluer. Au niveau technique, la marge de progression pour améliorer l'efficacité est encore considérable. Ceci dit, l'évolution des coefficients de performance annuels moyens pourraient cependant baisser dans un premier temps, si des installations nécessitant des températures « aller » élevées, continuent à être ré-équipées avec des pompes à chaleur. Cet effet peut être compensé par le poids donné dans les différents scénarios pour les catégories « Construction neuve », « Rénovation » et « Bâtiment ancien ».

ABSTRACT

Das Bundesamt für Energie ist daran die Energieperspektiven zu aktualisieren und eine Wärmestrategie auszuarbeiten. Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Wärmepumpen im Gebäudesektor mit EFH und MFH (ohne Wärmeverteilsysteme) ist für die Perspektiven eine detaillierte Betrachtung der zukünftigen Effizienzentwicklung der Wärmepumpentechnologie nötig. Dieser Bericht betrachtet die möglichen technischen Weiterentwicklungen und deren Potentiale sowie zusätzliche Einflussgrößen.

Im Gegensatz zu Hochrechnungen von Labormesswerten oder Simulationen berücksichtigt diese Prognose einerseits Messungen aus effektiven Betriebswerten von Wärmepumpen-Feldanlagen sowie diverse Studien anderer Hochschulen. Dazu sind die Wärmepumpen in die Kategorien «Neubau», «Sanierung» und «Altbau» für kleinere Gebäude gemäss ihrer Vorlauftemperatur im Auslegungspunkt eingeteilt. Für den Forecast bis 2050 wird eine vereinfachte lineare Hochrechnung unter Berücksichtigung des Gütegrades mit verschiedenen Szenarien verwendet. Ein beigefügtes Excel-Rechentool ermöglicht dabei die Anpassung der Szenarien. Des Weiteren können die Basisdaten auf zukünftig breiter abgedeckte Messwerte aus den Feldmessungen abgestützt werden.

Obwohl die möglichen Einflussgrößen auf die zukünftige Effizienz von Wärmepumpenanlagen sehr vielfältig und nicht vollständig vorhersehbar sind, können selbst im konservativsten Szenario deutliche Effizienzsteigerungen gegenüber der heutigen Technik prognostiziert werden. LW-Wärmepumpen erreichen hierbei im Altbau mit hohen Vorlauftemperaturen Jahreseffizienzwerte von grösser vier. Die höchsten Jahresarbeitszahlen von grösser sieben erreichen SW-Wärmepumpen mit niedriger Vorlauftemperatur im Neubau. Im besten Szenario sind hierbei Effizienzwerte von neun möglich. Zu beachten gilt es, dass diese Werte jeweils auf neuinstallierte Wärmepumpen zu beziehen sind. Sie spiegeln nicht den Gesamtbestand inkl. älterer Wärmepumpen im Feld dar.

Abkürzungsverzeichnis

BAFA	Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BFE	Bundesamt für Energie
EFH	Einfamilienhaus
E_{Tot}	elektrische Gesamtenergie der Wärmepumpen-Anlage
E_{UP_Senke}	elektrische Energie der Senkenumwälzpumpe (Heizkreis)
E_{ext_HS}	elektrische Energie externer Heizstäbe
GWP	Global Warming Potential
HFO	Hydrofluorolefin
HS	elektrischer Heizstab
IEA	International Energy Agency
JAZ+	Jahresarbeitszahl Heizen und Trinkwarmwasserbereitung, identisch mit JAZ Heizen & TWW
JAZ_Aufladung	Jahresarbeitszahl Trinkwarmwasserbereitung, identisch mit JAZ_TWW
JAZ_Heizen	Jahresarbeitszahl Heizen
LW	Luft-Wasser
MFH	Mehrfamilienhaus
PV	Photovoltaik
PVT	Photovoltaic thermal collector (Hybridkollektor)
Q_{Heizen}	erzeugte Wärmemenge im Heizmodus
$Q_{Aufladung}$	erzeugte Wärmemenge für die Trinkwarmwasseraufladung. Energieinput in den Trinkwarmwasserspeicher
SW	Sole-Wasser
TWW	Trinkwarmwasser
WNG	Wärmenutzungsgrad
WP	Wärmepumpe
WPSM	Wärmepumpensystemmodul

1 Generelle Aussagen zu Effizienz, Entwicklungen und Erwartungen

1.1 Kältemittel

Aufgrund stetiger Anpassung der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV), bedingt durch internationale Abkommen, wird eine Umstellung der verwendeten Kältemittel im Bereich der Haushaltswärmepumpen stattfinden. Es werden bereits Wärmepumpen mit Ersatzkältemitteln für das gängige R410a und R134a angeboten, hierzu zählen u.a. R452b (M-TEC GmbH), R454C (Stiebel Eltron), R513A (Ochsner) oder R32 (asiatische Hersteller). Als weitere mögliche Alternative wird noch das neue R466A (Danfoss, 09.2018) betrachtet.

Aus chemischer Sicht wird nun die vierte und letzte mögliche Generation an neuen Kältemitteln, die Hydrofluorolefine (HFOs) zur Marktreife entwickelt (Domanski, 2018). Als Alternative zu den synthetischen Mischungen bieten sich je nach Anwendungsbereich die natürlichen Kältemittel wie Kohlenstoffdioxid, Propan, Ammoniak und Wasser an. Der Grossteil dieser Stoffe ist jedoch leicht bis stark brennbar oder beschränkt im Einsatzbereich. Eine ähnliche Einschätzung findet sich auch in (Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., 2018).

Der Entwicklungstrend bei den Kältemitteln wird einerseits durch die europäische F-Gas Verordnung bestimmt. Damit einhergehend werden Preissteigerungen und Lieferschwierigkeiten bei den derzeitigen Kältemitteln mit hohem GWP (R410a, R134a) erwartet. Andererseits hat auch die Normgebung für die Verwendung von brennbaren Kältemitteln, welche u.a. in der DIN EN 60335 geregelt und derzeit angepasst wird², eine grosse Bedeutung. Die Marktdurchsetzung von neuen Kältemitteln steht in der technischen Dreiecksbeziehung GWP-Effizienz-Brennbarkeit.

Generell ist mit dem Wechsel des Kältemittels nicht mit einer nennenswerten Effizienzsteigerung der Wärmepumpe zu rechnen. Selbst mit technisch erweiterten Kältekreisläufen bleibt das Verbesserungspotential gering. Einige neue Kältemittel weisen sogar eine im niedrigen einstelligen Prozentbereich schlechtere Effizienz gegenüber dem derzeitigen Marktstandard R410A auf (Longhini, 09.2015), (Domanski, 2018), (Deutsches Umweltbundesamt, 2016).

1.2 Warmwasser und Legionellen

In IEA HPTAnnex 46 wird die Thematik der Trinkwarmwasserbereitung und Legionellenbekämpfung detailliert betrachtet (Kleefkens, 2018). Für den zukünftigen praktischen Umgang mit der Legionellenverbeugung wird die Gesetzgebung, insbesondere die SIA 385-1, von grösster Bedeutung sein. Planer und Installateure beziehen sich auf diese und betreiben die Anlagen aus Haftungsgründen entsprechend.

² Die International Electrotechnical Commission (ICE) hat für die gewerbliche Kühlanwendung das Limit von brennbaren Kältemitteln der Klasse A3 von 150 auf 500 g und für leicht entflammbare Kältemittel der Klasse A2 und A2L auf 1200 g erhöht.

Der Einfluss eines Legionellenprogramms auf den Energieverbrauch bei der Bereitstellung von Trinkwarmwasser ist auch im MFH untersucht (Roost, et al., 2018), (Vetsch, et al., 2012). Die eindeutige Korrelation von Legionellenschutz und Effizienzverminderung bei verschiedenen Aufladeszenarien in Mehrfamilienhäuser wird bestätigt. Eine optimierte Betriebsweise liefert einen Wärmenutzungsgrad (WNG) von leicht über 3. Eine Betriebsweise mit konstant 60 °C und rein elektrischer Erwärmung von 50 auf 60 °C reduziert den WNG auf nur noch 2.5 (Roost, et al., 2018). Bei MFH hat zudem die vorhandene Zirkulationsleitung einen deutlichen Einfluss auf die JAZ. Durch die Rückführung der Zirkulationsleitung wird die Speicherschichtung beeinträchtigt. Dies führt zu einer permanent höheren Rücklauftemperatur zur Wärmepumpe bei der Aufladung, was die JAZ_Aufladung bei einer Feldmessung um bis zu 20 % verringert hat (Vetsch, et al., 2012). Gleichbedeutend ist ein häufiges Nachladen des Speichers mit der Wärmepumpe, da auch dadurch die Wärmepumpe auf einem höheren Temperaturniveau betrieben werden muss.

Weitere Daten bezüglich Effizienzverminderung bei der Warmwasseraufladung aufgrund einer Legionellenschaltung bei EFH werden die aktuell laufenden Feldmessungen von Wärmepumpen an der Hochschule in Buchs (NTB) im Auftrag des BFE liefern. Generell ist jedoch der energetische Einfluss einer Legionellenschaltung in EFH gegenüber MFH wesentlich geringer einzuschätzen (Kleefkens, 2018). Dies ist u.a. durch geringere Leitungs- und Speichervolumina sowie einfacheren Vorschriften begründet.

Neben der gängigen thermischen Legionellenschaltung konnte sich die chemische oder physikalische Behandlung bis dato nicht durchsetzen (Bundesamt für Gesundheit, 03.2009).

Die Effizienz der Brauchwarmwasserladung wird zukünftig stark von der Gestaltung der neuen Vorschriften abhängen. Bleibt das derzeitige Temperaturniveau von 50 – 60 °C bestehen, sind Effizienzsteigerungen durch technologische Verbesserungen des Gütegrades möglich. Falls es aus hygienischen Gründen zu einer Temperaturerhöhung auf 70 – 80 °C, wie z.B. in den USA kommt, wird ein Technologiesprung zu transkritischen CO₂-Wärmepumpen(boiler) erwartet. Mit dieser Technologie sind selbst bei hohe Vorlauftemperaturen Effizienzwerte wie heute üblich erreichbar (Vetsch, et al., 2012).

1.3 Neue Energiequellen

Geothermische Wärme aus Tiefbauobjekten mit niedrigem Temperaturniveau (z.B. Tunnelbauwerke) sowie zusätzlich Betriebsabwärme zum Beispiel aus Autobahntunneln und Eisenbahnschächten bilden oft noch eine unerschlossene Wärmequelle (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2019). Seewassernutzung ist bereits jetzt Stand der Technik, wird aber aktuell nur in geringem Ausmass genutzt. Deshalb möchte beispielsweise der Kanton St. Gallen aktuell über die Möglichkeiten der Seewassernutzung als Wärmequelle im Bereich des Bodensee oder Walensee besser informieren (Zweili, 4.11.2019).

Grosses Potential könnte zukünftig auch die Abwärmenutzung aus Abwasser haben. Für Deutschland wird dieses Potential auf 6 % der gesamten Gebäudewärmeversorgung geschätzt (Bundesamt für Energie, 27.06.2018), (Born, et al., 2017). Die Effizienzsteigerung gegenüber Erdsonden-WP beträgt je nach Temperaturniveau 20 – 25 % (FEKA-Energiesysteme AG Bad Ragaz, kein Datum). Derzeit bestehen die generellen Schwierigkeiten bei neuen Energiequellen in der niedrigen bzw. nicht vorhandenen Wirtschaftlichkeit und die höheren Hürden bei Planung und Bau.

Potential versprechen auch kalte Wärmenetze, sogenannte Anergienetze oder Fernwärmenetze der 4. Generation. Bei Letzteren werden zusätzliche Energiequellen (industrielle Niedertemperaturabwärme, Solarthermie oder Geothermie) dezentral auf niedrigem Temperaturniveau genutzt (Born, et al., 2017). Insbesondere bei einem gleichzeitigen Wärme- und Kältebedarf weisen diese Netzkonzepte eine hohe Systemeffizienz auf. Mit zusätzlichen «Booster-Wärmepumpen» wird eine effiziente Temperaturerhöhung beim Wärmeverbraucher durchgeführt. Auch kann mit Wärmepumpen in einem Wärmenetz die Netzleistung für einen weiteren Ausbau durch Absenken der Rücklaufemperatur markant gesteigert werden, wie ein Fallbeispiel in Annex 47 (Bundesamt für Energie, 27.06.2018) aufzeigt. International werden die ersten Projekte in Neubaugebieten umgesetzt, prinzipiell ist jedoch auch eine Realisierung in Bestandsquartieren denkbar (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 08.2016), (Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., 2015).

Die bereits intensiv erforschte Kombination von Wärmepumpen mit Solarthermie wird zukünftig durch die Kombination PV und Wärmepumpe ersetzt, da die Preise für die PV-Module noch weiter sinken werden. Ein Vorteil der PV-WP-Kombination besteht darin, dass die sonst anfallende «Überschuss-Wärme» in den Sommermonaten bei einem PV-System in das Stromnetz eingespeist werden kann. Bei den Feldmessungen «WP Monitor» vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE erzielen Erdreich-WP mit Solarthermie für Trinkwarmwasserunterstützung eine Effizienzsteigerung von 3 - 15 %, bei zusätzlicher Heizungsunterstützung 6 - 29 % (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2013). Die Systemkomplexität bei thermischen Solaranlagen und entsprechenden hohen Investitionskosten führen oft zu einer fehlenden Rentabilität (Müller, A. et al., 12.2010), (Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., 2018), (Drück, 2016), welche in der Schweiz noch verstärkter auftritt. Dadurch ist, abgesehen von der Möglichkeit der Regeneration von schwachen Erdsonden sowie die Einspeisung in Wärmenetze nicht mit einer weiteren Verbreitung zu rechnen. PVT Kollektoren mit gleichzeitiger Nutzung von Solarthermie und PV Stromerzeugung können sich aufgrund der höheren Produkt- und Installationskosten im Moment ebenfalls nicht durchsetzen, eine Trendumkehr ist heute nicht erkennbar.

1.4 Solarstromnutzung und SmartGrid

Das SG-Ready Label hat sich mittlerweile bei den Wärmepumpen etabliert. Jedoch bleibt festzustellen, dass dies hauptsächlich als interne Schnittstelle zu PV-Anlagen verwendet wird. Insbesondere für die Kühlfunktion bietet sich der Eigenverbrauch an, da bei hohen PV Erträgen auch die höchsten Kühllasten auftreten. Eine Ansteuerung der Netzbetreiber erfolgt meistens nur mit einer on/off Freigabe. Nach Schätzung von Herrn Kersten von der Energieagentur Nordrhein-Westfalen werden in Deutschland ca. 20 – 30 % der Wärmepumpeninstallationen mit einer PV-Anlage gekoppelt (Born, et al., 2017). Auch eine Diskussion mit mehreren Herstellern in der Schweiz zeigt, dass die Kunden Geräte mit SG-Ready Funktion vermehrt wünschen. Heutige Steuerungen verwenden hierbei meist on/off oder eine Verschiebung der Heizkurve.

Weitere Entwicklungen zielen auf Cloudlösungen von SG-Ready Schaltungen ab, welche auch Schwarmintelligenz nutzen und ihre Algorithmen stetig verbessern. Der Fokus wird nicht mehr auf die Ansteuerung einzelner Wärmepumpen, sondern auf Cluster von Wärmepumpen u.a. in Nahwärmenetzen ge-

richtet. Hierfür müssten jedoch noch Datenschutzrichtlinien angepasst und flexiblere, attraktive Stromtarife eingeführt werden (Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., 2018). Daher ist auch hier die Entwicklung in der Schweiz stark von den gesetzlichen Rahmenbedingungen (z.B. StromVG) abhängig.

Es bleibt festzuhalten, dass die derzeit gängige Lastverschiebung in Form von überhöhten Soll-Vorlauf-temperaturen und ggf. die Verwendung eines Elektro-Heizstabes zur Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs die Effizienz des Wärmepumpensystems verschlechtert. Die Eigenstromverbrauchsquote mit angepassten Regeleinstellungen erhöht sich nach Ralf Dott dabei nur im einstelligen Prozentbereich (Bundesamt für Energie, 26.06.2019). Detailliert wird diese Thematik im IEA Annex 42, sowie als Überblick von Fischer und Madani (Fischer & Madani, 2017) betrachtet.

1.5 Kühlen mit Wärmepumpen

Bei der Thematik Kühlen mit Wärmepumpen gilt es zwischen einer Abkühlung der Raumlufttemperatur und dem Klimatisieren mit zusätzlicher Entfeuchtung zu unterscheiden. Mit Wärmepumpen und einem Flächenkühlsystem bietet sich nur die Möglichkeit einer Absenkung der Raumlufttemperatur um wenige Grad Celsius an. Aufgrund der Klimaerwärmung ist zwar mit einer Reduktion der Heizgradtage um 13 %, jedoch gleichzeitig mit einer Erhöhung der Kühlgradtage um 57 % (für Deutschland) zu rechnen (The Boston Consulting Group und Prognos, 2018). So wird die Kühlfunktion zukünftig zur Standardausstattung von Wärmepumpen zählen (Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., 2018). Systeme mit aktiver Kühlfunktion machen bereits fast 30 % im österreichischen Markt aus (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2019). Die theoretischen Effizienzwerte liegen im Bereich von 3.5 bis 4 bei aktiver Kühlung mittels elektrischer Kompressionswärmepumpe, für passive Kühlung mittels Erdwärmesonde und geringem Pumpstrombedarf sind Werte bis zu 25 möglich (Berechnungsgrundlage DIN EN 14825). Im Kapitel 2.7 werden Messwerte aus der Feldmessung dargestellt. Gasbetriebene Sorptionskältemaschinen werden in diesem kleinen Leistungsbereich derzeit nicht verwendet (Deutsches Umweltbundesamt, 2016) und werden daher in diesem Bericht nicht betrachtet.

Für EFH und MFH wird es aufgrund der Anlagenkomplexität und geringer Wirtschaftlichkeit keine verbreitete Abwärmenutzung (zum Beispiel für die Trinkwarmwasseraufbereitung) im Kühlbetrieb geben. Hierfür sind aufwändige Kältekreisssysteme und Anpassungen der Gebäudehydraulik notwendig. Somit bleibt dieser mögliche Zusatznutzen bzw. Effizienzsteigerung aus. Ein zukünftiger Trend kann eine integrierte Klimatisierung bei kontrollierten Wohnraumlüftungen mittels Luft/Luft Wärmepumpen im Niedrigenergiegebäude darstellen.

1.6 Gaswärmepumpe (Ad- und Absorption und Gasmotor)

Bei gasbetriebenen Wärmepumpen wird zwischen klassischen Motorkompressionswärmepumpen und Sorptionswärmepumpen unterschieden. Die geringe Preisdifferenz zwischen Strom- und Erdgaspreis in der Schweiz (im Vergleich zu anderen europäischen Ländern), sowie der erhöhte Wartungsbedarf gasmotorischer WP sind nachteilig im Vergleich zu elektrisch angetriebenen Kompressionswärmepumpen. Zudem fehlt es nach wie vor an einem Servicenetz der Hersteller von Sorptionswärmepumpen in der Schweiz. Derzeitige Anlagen werden hauptsächlich in Altbauten und Sanierungen eingesetzt (SVGW / VSG, 2011). Demgegenüber können in Deutschland Gassorptions-WP den elektrisch angetriebenen Wärmepumpen sowohl ökonomisch wie auch ökologisch, je nach verwendetem Strommix

(z.B. hoher Kohleanteil im deutschen Kraftwerkspark), überlegen sein (FIZ Karlsruhe GmbH & Leibniz Institut für Informationsinfrastruktur, 2013).

Bei Gassorptions-WP ist in den letzten Jahren eine kontinuierliche Reduktion der Heizleistung festzustellen, von 40 kW auf unter 20 kW. Dies bietet eine zunehmende Möglichkeit der Verwendung in EFH und MFH. Die theoretischen JAZ der Sorptionsmaschinen betragen ca. 1.4 bei Sorptionswärmepumpen und 1.6 bei Gasmotorwärmepumpen. Insbesondere letztere haben durch die hohen Abgastemperaturen einen Effizienzvorteil bei der Warmwasserbereitung. Als Nachteil der Gassorptions-WP gegenüber elektrischen Kompressionswärmepumpen ist der geringere Nutzen der Umweltwärme zu nennen.

Auffallend ist die hohe Forschungsaktivität im Bereich der Absorptionswärmepumpen u.a. in Österreich (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 08.2016) und in Annex 43 für brennstoffbetriebene WP. Somit darf in Zukunft noch eine Belebung des Marktfeldes erwartet werden, derzeit gibt es jedoch keinen Step-Change. In Verbindung mit der Power-to-Gas Technologie und der Verwendung von erneuerbarem systemischen Gas könnte diese Wärmepumpentechnologie eine effizientere und ökologischere Alternative zu den klassischen Brennwertgaskessel darstellen. Dennoch ist in der Schweiz aus den vorher genannten Gründen auch zukünftig nicht mit grossen Verkaufszahlen im Vergleich zu klassischen Wärmepumpen zu rechnen.

1.7 Hybrid Wärmepumpe und bivalente Systeme

Ein zusätzlicher Wärmeerzeuger im System bietet die Möglichkeit einer Energieträgerflexibilität und die Reduktion von Lastspitzen durch einen zweiten Energieträger, derzeit meistens Erdgas. Die Betriebsweise kann durch die verwendeten Reglereinstellungen CO₂-, kosten- oder strommarktoptimiert angepasst werden. Durch Ausschalten insbesondere von Luft Wärmepumpen bei sehr tiefen Aussentemperaturen kann die Jahresarbeitszahl dieser stark erhöht und der Bedarf an ggf. fossil erzeugtem Importstrom vermindert werden.

Damit bietet die Hybrid Wärmepumpe eine Möglichkeit dem Modernisierungstau des Gebäudeparks entgegenzuwirken. Jedoch wird sie nur eine Zwischenlösung bis zur Sanierung des Gebäudes auf ein Niedertemperaturheizsystem darstellen (Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., 2018). Vergleichbar wie die gasbetriebenen Wärmepumpen im vorherigen Kapitel 1.6 ist diese Option eher in europäischen Ländern mit günstigeren Erdgaspreisen (ökonomisch) bzw. mit hohen Emissionsfaktoren der Elektrizität (ökologisch) interessant. Zu beachten gilt es jedoch den Produktlebenszyklus insbesondere des zweiten Wärmeerzeugers. Ein im Jahr 2030 installiertes System kann bis nach 2050 in Betrieb sein. Ausserdem besteht die Gefahr der Verschiebung einer Ersatzinvestition bei einem Defekt der Wärmepumpe, da (evtl. unbemerkt) nur mit dem zweiten (fossil betriebenen) Wärmeerzeuger ohne Komforteinbussen geheizt werden kann. Wegen fehlenden Rahmenbedingungen gibt es zudem keinen Anreiz für eine ökologische Betriebsweise. Gegen diese Systeme sprechen auch die zweifachen Anschluss- und Wartungskosten, sodass diese erst bei grösseren MFH interessant sind.

1.8 Mehrfamilienhäuser

Sole-Wasser Wärmepumpen sind im MFH bereits etabliert. Luft-Wasser Wärmepumpen sind aufgrund der Platzverhältnisse und Lärmschutzvorschriften in städtischen Bestandsgebäuden generell eingeschränkt. Generell verhalten sich Grosswärmepumpen thermodynamisch ähnlich wie die untersuchten Kleinwärmepumpen, die Effizienz bleibt abhängig von den Quellen- und Senktemperaturen. Die thermischen Verluste und der elektrische Energiebedarf der Pumpen für die Wärmeverteilung sind unabhängig vom Wärmeerzeugertyp. Sie fallen auch bei einer fossilen oder mit Holz befeuerten Anlage an. Als Alternative zu einer grossen Wärmepumpe kann die benötigte Heizleistung mit mehreren kleineren Geräten kaskadiert werden. Zudem kann dadurch eine höhere Regelbarkeit und Effizienzsteigerung erreicht werden.

Eine effiziente Energiebereitstellung im MFH wird möglicherweise durch ein fehlendes Wärmepumpensystemmodul (WPSM) verhindert. Dies wird auch in einer Untersuchung bestätigt, bei welcher nur 25 % der Anlagen optimal in Betrieb sind (Roost, et al., 2018). Derzeit gibt es noch kaum bzw. wenige Effizienzwerte aus Feldmessungen von grösseren MFH. Studien von EnergieSchweiz zeigen jedoch generell höhere Umsetzungsschwierigkeiten, u.a. (EnergieSchweiz, 2018). Auf der anderen Seite gibt es vermehrt Wärmecontracting-Angebote, wodurch die Dienstleister an einer hohen und dauerhaften Systemeffizienz interessiert sind. Aktuelle Forschungsschwerpunkte im Bereich der MFH bilden Annex 50 und 52 sowie ein aktuelles Grossprojekt in Deutschland mit dem Titel «Lowex-Bestand» (www.lowex-bestand.de). Aus diesem Projekt liegen jedoch derzeit noch keine Messwerte vor.

Als Herausforderung im MFH bleibt der Anspruch, jeden Mieter mit seiner gewünschten Wohnraumtemperatur zufriedenzustellen. Dies führt zu einer höheren Systemvorlauftemperatur (effizienzmindernd) und einer längeren Heizperiode in der Übergangszeit (Bundesamt für Energie, 22.06.2016). Zusätzlich besteht im MFH eine verstärkte Legionellenproblematik, (siehe Kapitel 1.2) und die Speicherdurchmischung durch die Warmwasserzirkulation. Daher ergeben sich stets hohe Ladetemperaturen ohne Nutzen eines niedrigeren Temperaturniveaus beim Ladebeginn (Vetsch, et al., 2012). Die Unterschiede bei der Effizienz der Trinkwarmwasserladung für MFH sind im Kapitel 1.2 beschrieben.

Des Weiteren fördern die aktuell rechtlichen Bestimmungen zwischen Mieter und Vermieter keine effizientere Betriebsweise. Solange Optimierungen nicht (bzw. nur teilweise) auf die Nebenkosten umgelegt werden dürfen, gibt es kaum Anreize für den Vermieter, Effizienz- und Energieoptimierungen durchführen zu lassen. Eine Alternative könnte der Anspruch des Mieters auf eine Mindestjahreseffizienz oder einen maximalen Jahresenergieverbrauch darstellen.

1.9 Entwicklungstrends

Im Bereich der Digitalisierung wird sich der zukünftige Fokus auf die Entwicklung von sogenannten Plug&Play Reglersystemen bzw. auf selbstlernende Regelalgorithmen mit automatischer Fehlerdetektion und Optimierungsfunktion richten. Diese dienen einerseits zum Sicherstellen eines störungsfreien und (zweitrangig) effizienten Betriebs der Wärmepumpe (Born, et al., 2017), als auch zum Gegenwirken des Fachkräftemangels und somit als Unterstützung für die Servicekraft bei einem Anlagenbesuch (Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., 2015). Durch ein besseres Monitoring könnten Hersteller oder Installateure neben der Hardwaregarantie auch eine Effizienzgarantie anbieten. Dies wird von den Herstellern derzeit jedoch noch abgelehnt.

Des Weiteren können sich durch die Digitalisierung neue Geschäftsmodelle, wie z.B. Effizienzcontracting oder lokale Energiebörsen in Anlehnung an Kapitel 1.4 entwickeln. Jedoch werden Überwachungen von Kleinanlagen derzeit aus mangelndem ökonomischen Interesse oder auch juristischen Unklarheiten weder von den Anlagenbesitzern noch von Herstellern oder Betreibern nachgefragt.

Im Bereich der Wärmepumpentechnik gilt es zwischen den Wärmepumpentypen zu unterscheiden: Bei den LW-Wärmepumpen hat sich der Fokus von der Effizienz auf die Schallthematik verlagert. Speziell die vermehrt schwierige Einbausituation und Bestimmungen in städtisch dichter Bebauung hat zur Entwicklung von speziellen Nachtabsenkprogrammen oder Schalldämmhauben geführt. Diese Modifikation der Wärmepumpe entspricht dann jedoch nicht mehr den Effizienzwerten gemäss Typenprüfung im Labor bzw. den Herstellerangaben. Die Schallthematik ist den Herstellern bekannt und seit wenigen Jahren kommen auch sehr leise Wärmepumpen ab Werk auf den Markt (Eschmann, 2018).

Einen zukünftigen Trend können auch kleine, sehr effiziente Luft-Luft-Wärmepumpen in Kombination mit einer Wohnraumlüftung auf niedrigem Temperaturniveau für Niedrigenergiegebäude darstellen (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 08.2016). Mit solchen Systemen wäre auch eine einfache Klimatisierung (Kapitel 1.5) im Sommer möglich.

Für SW-Wärmepumpen sind neue antriebslose Wärmeentzugssysteme mit geringerem oder keinem Hilfsstrombedarf für eine Effizienzsteigerung von Interesse. Mit einer CO₂-Erdwärmesonde nach dem Wärmerohr oder Heatpipe-Prinzip sollten sich um 0.5 bis 1.0 höhere Jahresarbeitszahlen (Müller, A. et al., 12.2010) bzw. eine Gesamteffizienzsteigerung von 15 - 20 % (derzeitiges Forschungsprojekt am Institut für Energiesysteme, NTB) erreichen lassen. Aufgrund der immer dichter werdenden Nutzung von Erdsonden im städtischen Bereich sind trotz zunehmender Regeneration der Sonden sowie der aktualisierten Normengebung für Erdsonden keine höheren Quellentemperaturen für SW-Wärmepumpen zu erwarten.

Einen Effizienzsprung kann der Turboverdichter auslösen, welcher vor allem im Betrieb mit niedrigen Senkenvorlaufttemperaturen die Effizienz deutlich erhöhen kann. Diese Technologie befindet sich derzeit noch für Kleinwärmepumpen im Forschungsstadium. Die nötige hochpräzise Fertigung und die daraus resultierenden höheren Produktionskosten verhindern eine rasche Markteinführung.

Für beide Wärmepumpentypen (LW und SW) zeigt sich die Marktdurchsetzung von leistungsvariablen Geräten. Mit den Feldmessungen vom WPZ im Auftrag des BFE können nun tatsächlich erreichte Effizienzsteigerungen bei LW-WP gegenüber on/off Geräten von bis zu 20 % im Niedertemperaturbereich bestätigt werden. Die benötigte Entwicklungsdauer einer neuen Technologie ist jedoch auch hier erkennbar, war doch die Technik und Regelung anfänglich der Markteinführung kaum effizienter als die herkömmlichen on/off Wärmepumpen (Hubacher & Bernal, 2015).

1.10 Politische und gesetzliche Rahmenbedingungen

Die politischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen werden auf die zukünftige Wärmepumpentechnologie und -verwendung weiterhin einen erheblichen Einfluss haben. Die Entscheidung für ein Wärmepumpensystem wird ökonomisch und ökologisch bestimmt bleiben - weshalb die zukünftige Energiepreisentwicklung (Strom) auch einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz der eingesetzten Wärmepumpentechnologie haben wird. Komplexerer und damit teurere Kältekreisssysteme können je nach Kältemittel 5 bis 10 % Effizienzsteigerung bewirken. Erst mit zukünftig höheren Energiepreisen wird es

ökonomisch interessant werden, weitere Effizienzverbesserungen durchzuführen. Dies zeigt sich auch bei den im Auftrag des BFE durchgeführten Feldmessungen. Falls der wirtschaftliche Anreiz auch zukünftig fehlt, könnte der Gesetzgeber die Massnahmen auch als Pflicht in Form von Mindestanforderungen vorschreiben. Alternativ setzt sich das Wärmepumpensystemmodul, welches in vielen Kantonen bereits Voraussetzung für eine finanzielle Förderung ist, immer weiter durch (Dellios, et al., 2018). Mit diesem Modul werden ebenfalls Überprüfungen des Anlagenbetriebes im Feld vorgeschrieben und damit die Effizienz erhöht bzw. sichergestellt.

Eine zukünftige Beschränkung oder Verbot von fossilen Heizungen wird sich in vielfältiger Weise auf die Effizienz von Wärmepumpen auswirken: Eine zunehmende Marktabdeckung mit Wärmepumpen führt auch zur Verwendung dieser Technologie in ungenügend sanierten Gebäuden. Die benötigte höhere Vorlauftemperatur führt zu einem starken Effizienzurückgang. Diese negative Korrelation von Effizienz vs. Marktdurchdringung ist ebenfalls bereits detailliert prognostiziert (Henning & Palzer, 2013). Ein Verbot von fossilen Heizungen könnte die heutigen Förderungsmodelle für Wärmepumpen obsolet machen, wodurch ein freiwilliger Fortbestand des Wärmepumpensystemmoduls fraglich erscheinen kann. Die erreichten Effizienzsteigerungen jeder einzelnen Anlage im Betrieb mit diesem Modul würden ohne eine regulatorische Pflicht entfallen. Ohne Förderung und steigenden Energiepreisen könnten sich zukünftig vermehrt sog. Billig-Wärmepumpen ohne technisch effizienzsteigernde Hardware durchsetzen. Für den Endkunden bleibt eine Unterscheidung mit dem jetzigen Energielabel schwierig, da derzeit fast sämtliche Wärmepumpen die Bestnote erhalten. Eine engere Abstufung der Effizienz könnte hier entgegenwirken. Die Umsetzung der meisten in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen technischen Massnahmen zur Effizienzsteigerung hängt direkt von den politischen und legislativen Rahmenbedingungen ab. Eine Verschärfung der Mindestvorschriften oder ähnliche Regularien sind zu erwarten.

1.11 Quantitatives Betrachtungsmodell

Mit Abbildung 1 sollen die möglichen und vielfältigen Einflussgrössen auf die zukünftige Effizienz von elektrisch angetriebenen Wärmepumpensystemen veranschaulicht werden. Auf einen Blick ist erkennbar, dass eine ausschliesslich positive Entwicklung der Effizienz aus unserer Sicht nicht per se gegeben ist und insbesondere, wie im vorherigen Kapitel thematisiert, den politischen Rahmenbedingungen die grösste bzw. unsicherste Bedeutung zukommt.

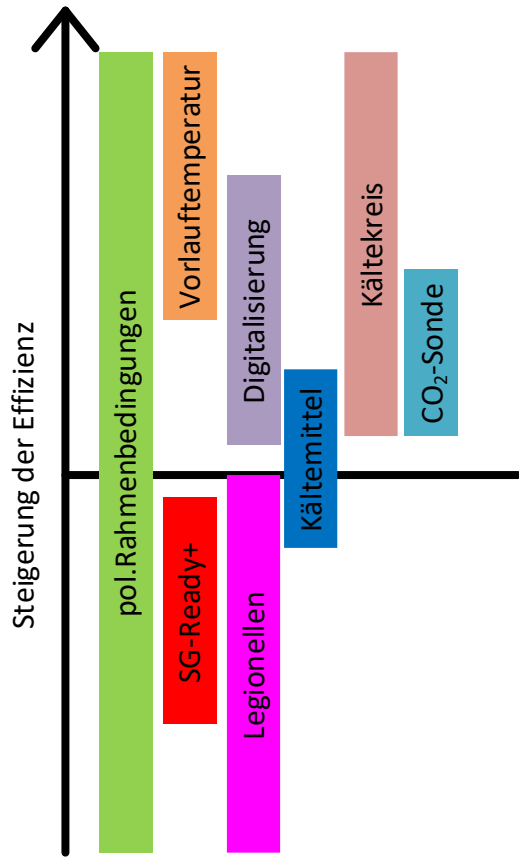


Abbildung 1: Einflussgrößen auf die Effizienz von Wärmepumpen

2 Prognose JAZ Entwicklung von Elektrowärmepumpen

2.1 Systemgrenze

Die verwendeten Systemgrenzen beziehen sich analog zu den Jahresberichten der Feldmessung von Wärmepumpen auf die Vorgaben des BFE (siehe Anhang).

$$JAZ+ = (Q_{Heizen} + Q_{Aufladung}) / (E_{Tot} - E_{UP_Senke} - E_{ext_HS})$$

$$WNG = (Q_{Heizen} + Q_{Aufladung}) / E_{Tot}$$

In der JAZ+ ist somit die gesamte durch die Wärmepumpe gelieferte Wärmemenge für Warmwasseraufladung und Heizung integriert, sowie der Gesamtstrombezug ohne den Strombedarf für Umwälzpumpen auf der Wärmesenkenseite oder den Stromverbrauch der elektrischen Heizstäbe. Im Gegensatz dazu wird der WNG mit dem Gesamtstrombezug berechnet

In den Auswertungen wird auch JAZ_Heizen bzw. JAZ_Aufladung für den entsprechenden Betriebsmodus berechnet. Hier kann der Energiebedarf für Steuerung und Standby während der Stillstandszeit nicht sinnvoll zugeordnet werden und wird deshalb in diesem Zeitbereich vernachlässigt.

Bei den von den Betriebsmodi unabhängigen Kennwerten JAZ+ und WNG sind diese Standbyverbräuche aber enthalten. Generell sind die Abweichungen durch die Vernachlässigung bei den Betriebsmodi im unteren einstelligen Prozentbereich und somit innerhalb der Mess- und Prognosegenauigkeit.

Die Systemgrenze ist somit nicht nur auf die einzelnen Komponenten begrenzt sondern auch zeitlich bestimmt.

2.2 Methodik zur Bestimmung derzeitiger JAZ-Werte

Es werden die JAZ Werte der Wärmepumpen, aufgeteilt nach LW- und SW-Wärmepumpen mit den Messdaten der Heizsaisons 2017/18 und 2018/19, bestimmt. Für LW Wärmepumpen können 9 Objekte mit insgesamt 15 Messsaisons und für SW Wärmepumpen 7 Objekte mit 13 Saisons ausgewertet werden.

Als erster Schritt wird für jede Anlage gemäss Abbildung 2 die individuelle Vorlauftemperatur im Auslegepunkt durch lineare Extrapolation der Tagesmittelwerte bestimmt. Berücksichtigt werden nur jene Tagesmittelwerte, bei welchen die Wärmepumpe mind. 1h im Betriebsmodus «Heizen» war.

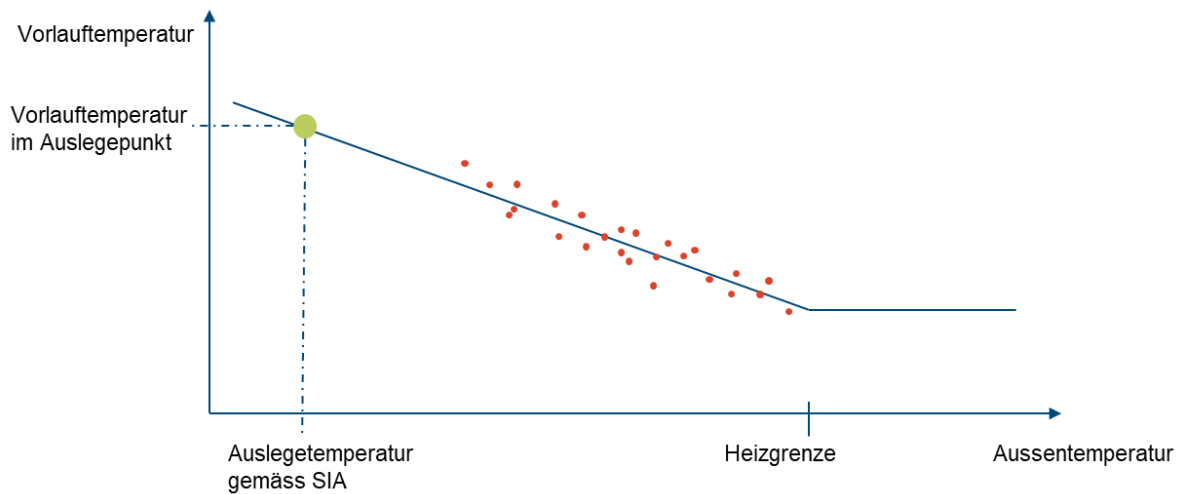


Abbildung 2: Bestimmung der Vorlauftemperatur im Auslegepunkt

Im zweiten Schritt wird in Abbildung 3 der gemessene JAZ-Wert der Wärmepumpe über die Vorlauftemperatur im Auslegepunkt des jeweiligen Objektes aufgetragen (violetter Punkt). Mit den Werten sämtlicher LW- bzw. SW-Objekte und der beiden Auswertejahre lassen sich nun Berechnungsformeln ableiten. Als Ansatz wird eine Funktion der Form $1+e^{-(T/k)}$ gewählt, da sich die JAZ-Werte bei sehr hohen Vorlauftemperaturen physikalisch dem Wert 1 annähern. Die Effizienzwerte werden je nach Wärmepumpentyp für den Heizbetrieb (JAZ_Heizen) und Gesamtbetrieb (JAZ+ = Heizen und Trinkwarmwasser) ermittelt.

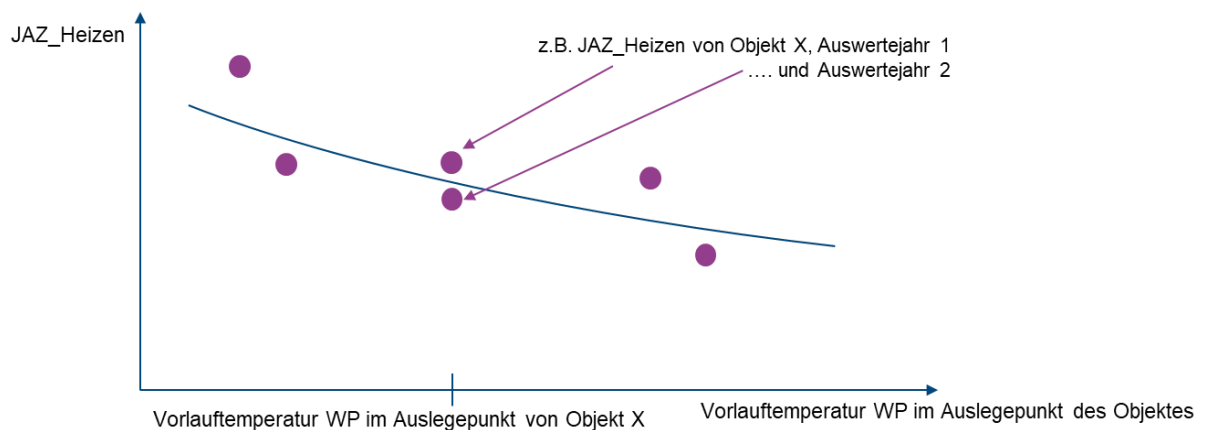


Abbildung 3: Ermittlung der Effizienz-Formel je Wärmepumpentyp in Abhängigkeit der Auslegevorlauftemperatur

Bei den Jahres-Messwerten wurden keine Objekte bzw. Saisonen berücksichtigt, welche in der betreffenden Saison weniger als 250 Messtage aufweisen konnten (und somit vor dem 25. Dezember der aktuellen Saison ins Programm aufgenommen wurden). Damit soll garantiert werden, dass in den entsprechenden Kennwerten auch ein Grossteil der Heizsaison ausgewertet wurde. Eine Saison startet am 1. September des aktuellen Jahres und geht bis zum 31. August des folgenden Jahres.

Bivalentanlagen wurden ausgeschlossen, bei Objekten mit einer separaten Trinkwarmwassererwärmung, z.B. mittels Wärmepumpenboiler, wurden nur die Heiz-Kennwerte berücksichtigt. Auflade-Kennwerte und Gesamtkennwerte können hier nicht ermittelt werden, da die thermische Leistung der Aufladung bei diesen Anlagen nicht gemessen werden konnte.

Mittels der vier Berechnungsformeln für LW und SW Wärmepumpen mit den Betriebsmodi Heizen und Heizen & Trinkwarmwasser können damit die JAZ Werte für die drei Vorlauftemperaturen 35 °C im Neubau, 45 °C für Sanierung und 55 °C im Auslegungspunkt berechnet werden. Da die JAZ_Trinkwarmwasser nicht vom Gebäudetyp bzw. von der Vorlauftemperatur abhängt, werden hier die gemessenen Jahresmittelwerte je Wärmepumpentyp verwendet, ohne Unterscheidung des Objekttyps nach «Neubau», «Sanierung» oder «Altbau».

Eine Unterscheidung zwischen EFH und MFH ist aufgrund der Feldmessobjekte derzeit nicht möglich. Die reine Effizienz der Wärmepumpe (COP-Herstellerdaten) für ein EFH mit kleiner 15 kW und für ein MFH mit grösser 15 kW Heizleistung unterscheiden sich nach einer Prüfung der BAFA Liste nicht (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 28.06.2019). Bedeutende Unterschiede sind hauptsächlich in der Trinkwarmwasserbereitung, siehe Kapitel 1.2 und 1.8, sowie in der Betriebsweise, z.B. durch eine höhere Vorlauftemperatur, zu erwarten. JAZ-Werte für MFH könnten mit einer gegebenen Vorlauftemperatur im Auslegungspunkt anhand der für die EFH hergeleiteten Formeln berechnet werden. Die höheren Wärmeverluste bei MFH in den Verteilleitungen bei einer zentralen Heizungsanlage sind unabhängig der Wärmeerzeuger. Diese fallen auch bei einer fossil betriebenen Heizungsanlage an

2.3 Effizienzzahlen Feldmessung Heizen und Trinkwarmwasser

In Tabelle 1 sind die ermittelten Effizienzzahlen aus der Feldmessung der Heizsaisonen 2017/18 und 2018/19 aufgeteilt und nach Wärmepumpentyp und Anwendung dargestellt. Wie im Kapitel 2.2 beschrieben sind die JAZ Heizen und JAZ Heizen & Aufladung formelbasiert und je Gebäudetyp berechnet, JAZ_Aufladung wird gemäss Methodik nicht nach Gebäudetyp unterschieden und beinhaltet somit gemessene Mittelwerte aller Anlagen.

Tabelle 1: JAZ Werte aus den Feldmessungen der Heizsaison 2017/18 und 2018/19

WP-Typ	JAZ Heizen [-]	JAZ TWW [-]	JAZ Heizen & TWW [-]
NEUBAU mit 35-30 °C			
LW	3.7	2.8	3.5
SW	5.7	3.2	4.9
SANIERUNG mit 45-40 °C			
LW	3.3	2.8	3.1
SW	5.0	3.2	4.6
ALTBAU mit 55-50 °C			
LW	2.9	2.8	2.8
SW	4.4	3.2	4.3

2.4 Effizienz beim Kühlen

Aus den Feldmessdaten 2017/18 und 2018/19 beträgt die Gesamteffizienz inkl. aller Nebenaggregate einer aktiv kühlenden LW-Wärmepumpe im Jahresmittelwert 5.1 bis 5.4. Zwei SW-Wärmepumpen kühlen passiv, die jährliche Effizienzbandbreite ist jedoch zwischen 7.5 bis 12.8 sehr gross. Somit zeigt sich, dass mit LW-Wärmepumpen die theoretische Effizienz nach Planungsdaten in der Feldmessung überboten und beim passiven Kühlen mittels Erdsonde sehr deutlich unterschritten wird, siehe Kapitel 1.5. Sollten sich zukünftig antriebslose CO₂- Erdwärmesonden durchsetzen ist mit dieser Technologie kein passives Kühlen mehr möglich. Durch eine Weiterentwicklung der Wärmepumpentechnologie analog zu den 3 Szenarien mit Gütegraden von 0.65 bis 0.55 im Heizbetrieb kann die Kühleffizienz bis 2050 für aktive LW-Wärmepumpen mit 8 beziffert werden. Bei passiver Erdwärmekühlung ist nur die die Effizienz und optimale Einstellung der Umwälzpumpen von Bedeutung. Hier sollten zukünftig Effizienzzahlen von 20 erreichbar sein.

2.5 Ermittlung WNG aus JAZ

Für eine allgemeine Bestimmung des WNG aus der JAZ sind die Systemgrenzen gemäss Kapitel 2.1 zu berücksichtigen. Neben den Senkenpumpen hat ein elektrischer Heizstab den grössten Einfluss auf den WNG. Bei den Feldmessungen 2017/18 und 2018/19 ist nur für die Trinkwarmwasserbereitung elektrisch nachgeheizt worden. Für den reinen Heizbetrieb ist der WNG gegenüber der Jahresarbeitszahl JAZ+ über alle Wärmepumpen um nur ca. 5 % vermindert. Tendenziell ist die Reduktion bei Neubauobjekten leicht höher als im Altbau, da der elektrische Energiebedarf für die Senkenpumpe bei einem höheren Heizwärmebedarf weniger ins Gewicht fällt.

Für die Trinkwarmwasserbereitung ohne Legionellenschaltung bzw. ohne generelle elektrische Nachladung (elektr. Energieanteil Heizstab kleiner 10 %) beträgt die Verminderung, wie in Tabelle 2 dargestellt, nur 4 %, bei Anlagen mit elektrischer Nachladung 18 % des Aufladeanteils. Somit wird deutlich, dass Wärmepumpensysteme bzgl. des WNG hauptsächlich auf den Einsatz des elektrischen Heizstabes für die Trinkwarmwasserladung zu unterscheiden sind.

Bei Betrachtung der Gesamt-Kennwerte (Heizen & TWW) vermindert sich der WNG um ca. 5-10 % bezogen auf die JAZ. Zu beachten ist jedoch, dass dieser Einfluss bei einem derzeitigen noch hohen Heizenergieanteil von über 75 % gilt. Wenn dieser Anteil aufgrund thermischer Sanierungen und Klimaerwärmung zukünftig abnehmen wird, nimmt der Einfluss der Aufladung zu.

Obwohl für MFH keine Messwerte für die Effizienz aus der Feldmessung vorliegen, ist aus unserer Sicht und unter Berücksichtigung der Kapitel 1.2 und 1.8 die Verminderung des WNG für MFH von ca. 25 % (hohe Rücklauftemperaturen durch Hochhaltung) für die Trinkwarmwassererwärmung mit Heizstab realistisch (Vetsch, et al., 2012), (Roost, et al., 2018) und (Kleefkens, 2018). Im reinen Heizbetrieb zeigen die Labormessungen am WPZ und die BAFA-Liste, dass keine signifikanten Effizienzunterschiede in der Wärmebereitstellung bei unterschiedlichen Leistungsgrössen vorhanden sind. Die Wärmeverluste in grossen Verteilnetzen durch eine zentrale Heizungsanlage sind nicht berücksichtigt. Sie fallen aber bei jeder Art von Wärmeerzeuger (fossil, Holz, Wärmepumpe) an.

Tabelle 2: Prozentuale Verminderung WNG gegenüber JAZ

WNG zu JAZ	Heizen	TWW	TWW mit HS	Heizen&TWW
LW & SW für EFH	-5 %	-4 %	-18 %	-5 bis -10 %
LW & SW für MFH	-5 %	-20%	-25 %	-10 bis -15 %

2.6 Methodik Forecast bis 2050

Der Forecast bis 2050 ist mit einer linearen Extrapolation berechnet. Die prognostizierten Effizienzwerte sind unterteilt in die drei angenommenen Szenarien «Worst Case» (WC), «Average Case» (AC) und «Best Case» (BC) mit den verschiedenen Gütegraden von 0.65, 0.60 und 0.55. Im Rechentool sind diese angenommenen Gütegrade für eine ggf. zukünftige Änderung anpassbar. Da weder Technologiesprünge noch geänderte Rahmenbedingungen (Kapitel 1.10) in naher Zukunft zu erwarten sind, ist diese lineare Vereinfachung aus unserer Sicht anwendbar. Tendenziell wird die technologische Entwicklung zum Maximum hin abflachen. Dieser Effekt dürfte aber im Vergleich zu allen anderen Unsicherheiten jedoch relativ gering sein, weshalb wir diesen Weg gewählt haben. Den Zeitpunkt für Technologiesprünge vorherzusagen ist aus heutiger Sicht nicht möglich, da diese vor allem von den politischen Rahmenbedingungen und nicht nur den technischen Möglichkeiten geprägt sein werden. Eine Hochrechnung über 2050 hinaus wäre sehr spekulativ und daher in unseren Augen nicht empfehlenswert. Zukünftige Effizienzgewinne sind einerseits durch eine weiterentwickelte Technologie der Wärmepumpe, verbesserte Wärmeübergangssysteme (grössere Heizflächen und eine besserer Gebäudedämmung für niedrigere Vorlauftemperaturen sowie höhere Wärmequellentemperaturen) und durch eine verbesserte Installation mit optimierter Betriebsweise (z.B. Digitalisierung und selbst optimierende Systeme) begründbar. Die Gesamteffizienz einer Wärmepumpenanlage wird des Weiteren durch das Verhältnis von Heizenergie zum Gesamtenergiebedarf inkl. Trinkwarmwasser bestimmt. So vermindert eine zukünftig verbesserte Gebäudedämmung höhere Gesamteffizienzwerte für Wärmepumpensysteme.

Derzeit wird eine Klimaerwärmung von 1 bis 2 Kelvin bis 2050 vorhergesagt. Dies führt bei LW-Wärmepumpen zu höheren Quellentemperaturen und bei beiden Wärmepumpentypen zu einer geringeren mittleren Vorlauftemperatur (Heizkurve). Auch kann sich speziell bei LW-Wärmepumpen die Anzahl der Abtaugungen in Verbindung mit einer optimierten Technik (Kapitel 1.9) stark reduzieren. Da es nicht möglich ist, die einzelnen Effekte auf die Effizienzentwicklung zu projizieren, sind in dieser Methodik alle Effekte im zukünftig angenommenen Gütegrad kombiniert enthalten.

Deutlich hervorzuheben bleibt die mögliche Beeinflussung durch die zukünftigen politischen Rahmenbedingungen auf die Effizienzentwicklung, siehe auch Kapitel 1.10. Dieser Einfluss ist mindestens so hoch wie die sonstigen technische Weiterentwicklung einzuschätzen und wird den Zeitpunkt der Umsetzung von Effizienzsteigerungsmassnahmen bestimmen.

Für die lineare Extrapolation werden die heutigen Gütegrade je Wärmepumpentyp, Gebäude und Betriebsmodus aus den Feldmessdaten berechnet und anschliessend erfolgt die Hochrechnung je Szenario bis 2050. Diese Methodik basiert im Vergleich zu anderen Simulationen ausschliesslich auf Messdaten aus dem BFE Feldmessprogramm. Aufgrund der noch geringen Datenbasis (siehe Kapitel 2.2) sind gewisse Unsicherheiten gegeben. Vorteil der Methode ist jedoch die sehr detaillierte Messung im Feld anstelle der Hochrechnung von Labormesswerten. Die Effizienzwerte sind für neu installierte Wärmepumpensysteme zu betrachten, sie spiegeln nicht den Mix aller Wärmepumpen im Betrieb für ein beliebiges Jahr wieder. Bis 2050/60 werden die derzeit in der Feldmessung verbauten Wärmepumpen mit einer Nutzungsdauer von weniger als 20 Jahren durch mindestens zwei neuere Anlagengenerationen ersetzt werden.

Die angenommenen Gütegrade in dieser Methodik von bis zu 65 %, bezogen auf die Quellen- und Senktemperaturen (nicht kältekreisseitig), sind zum Beispiel auch von Stefan Renz bereits an der 19. Wärmepumpentagung 2013 in Burgdorf mit 65 % bis 70 % Gütegrad bekräftigt worden (Bundesamt für Energie, 26.06.2013). Seine Effizienzvorgaben für 2025 können die besten Anlagen bereits jetzt in den Feldmessungen fast erfüllen.

Im Rechentool ist keine Unterscheidung des Gütegrades je Szenario von LW- und SW-Wärmepumpen vorgesehen. Tendenziell sind die technischen Hürden mit Luft als Quellenmedium höher. Je nach Betrachtung und Differenzierung schlagen wir vor für LW Wärmepumpen das «Average Case» und für SW das «Best Case» Szenario zu verwenden.

Gegenüber anderen Studien, welche eine pauschale Effizienzsteigerung von 0.x % pro Jahr bis 2050 annehmen, wird nicht der physikalisch mögliche Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Temperaturhubes (Carnot-Wirkungsgrades) berücksichtigt. So nimmt Energie Dialog Schweiz für 2005-2035: 0.8 % pro Jahr Effizienzsteigerung an und für 2035-2050 0.6 % (Verein Energie Dialog Schweiz, kein Datum). Diese Annahme mit der Unterscheidung ab 2035 erscheint für uns schwer vorhersehbar.

2.7 Effizienzzahlen 2050

Tabelle 3 zeigt die prognostizierten Effizienzwerte auf Basis der Feldmessdaten aus Kapitel 2.3 für LW- und SW-Wärmepumpen, unterteilt in die drei Gebäudekategorien Neubau, Sanierung und Altbau sowie unterschieden nach den Szenarien best-, average- und worst-case.

Zu erkennen ist der grosse Effizienzunterschied zwischen LW- und SW- Wärmepumpen hauptsächlich im Niedertemperaturbereich, da hier die höheren Quellentemperaturen verhältnismässig mehr Einfluss zeigen. Im Gegensatz dazu ist der Unterschied im Altbau geringer (viel Laufzeit bei hohen

Umgebungstemperaturen der LW-Wärmepumpe). SW-Wärmepumpen mit höherer Vorlauftemperatur weisen nach den Feldmessungen einen höheren Gütegrad auf als im Niedertemperaturbereich.

Selbst mit dem vorsichtigsten Szenario mit einem angenommenen Gütegrad von 55 % sind aus unserer Sicht bis 2050 signifikante Steigerungen über die heutige Effizienz erreichbar. Die grosse Variation der Szenarien bleibt vor allem den unsicheren Entwicklungen der Rahmenbedingungen (Kapitel 1.10) geschuldet.

Tabelle 3: JAZ Werte für 2050 unterteilt in die 3 Szenarien Best-Case, Average-Case und Worst-Case

	Best-Case (0.65)			Average-Case (0.60)			Worst-Case (0.55)		
	2050 Rechnung mit $\eta=0.65$			2050 Rechnung mit $\eta=0.60$			2050 Rechnung mit $\eta=0.55$		
WP-Typ	JAZ Heizen [-]	JAZ TWW [-]	JAZ Heizen & TWW [-]	JAZ Heizen [-]	JAZ TWW [-]	JAZ Heizen & TWW [-]	JAZ Heizen [-]	JAZ TWW [-]	JAZ Heizen & TWW [-]
	NEUBAU mit 35-30 °C								
LW	7.0	5.3	6.8	6.5	4.9	6.3	5.9	4.5	5.7
SW	9.1	5.1	8.6	8.4	4.7	7.9	7.7	4.4	7.3
	SANIERUNG mit 45-40 °C								
LW	5.6	5.3	5.6	5.2	4.9	5.1	4.8	4.5	4.7
SW	7.2	5.1	6.5	6.6	4.7	6.0	6.1	4.4	5.5
	ALTBAU mit 55-50 °C								
LW	5.0	5.3	4.9	4.6	4.9	4.5	4.2	4.5	4.2
SW	5.3	5.1	5.2	4.9	4.7	4.8	4.5	4.4	4.4

3 FAZIT

Basierend auf den Feldmessungen vom BFE und den daraus abgeleiteten Berechnungen wurde eine Prognosemöglichkeit für die Effizienzentwicklung von Wärmepumpen erstellt.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Entwicklungsmöglichkeiten sind drei Szenarien erstellt. Die politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen sind hauptentscheidend, können heute aber nur begrenzt vorhergesagt werden. Diese sind somit am wesentlichsten für die Geschwindigkeit der Effizienzveränderungen. Auf technischer Seite ist noch genügend Potential für weitere Effizienzverbesserungen vorhanden. Dabei wird die Technologie der elektrisch angetriebenen Wärmepumpen in der Schweiz dominierend bleiben.

Folgende Effekte werden die Effizienzentwicklung am massgeblichsten beeinflussen:

- Politische Rahmenbedingungen
- Veränderung Gebäudestandard / Vorlauftemperaturen
- Technologische Veränderungen (Kältemittel, Kompressoren, Expansionsgeräte, Kreislaufverbesserungen, SG-Ready, Digitalisierung)
- Warmwasser und Legionellenschutz
- Wärmequellen (CO₂ Sonde, Abwärmenutzung, etc.)

Die Entwicklung der durchschnittlich erzielten Arbeitszahlen im Feld könnte einige Jahre sogar sinken, da derzeit noch vermehrt Objekte mit höherer Vorlauftemperatur durch Wärmepumpen-Anlagen umgerüstet werden. Dieser Effekt kann über die Gewichtung der Szenarien für «Neubau», «Sanierung» und «Altbau» abgedeckt werden.

Literaturverzeichnis

- Born, H. et al., 2017. *Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends* -, Bochum: Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW).
- Bundesamt für Energie, 22.06.2016. *News aus der Wärmepumpen-Forschung - 22. Tagung*. Burgdorf, Bundesamt für Energie.
- Bundesamt für Energie, 26.06.2013. *News aus der Wärmepumpen-Forschung - 19. Tagung*. Burgdorf, Bundesamt für Energie.
- Bundesamt für Energie, 26.06.2019. *News aus der Wärmepumpenforschung - 25. Tagung*, Burgdorf: Bundesamt für Energie.
- Bundesamt für Energie, 27.06.2018. *News aus der Wärmepumpen-Forschung - 24. Tagung*. Burgdorf, Bundesamt für Energie.
- Bundesamt für Gesundheit, 03.2009. *Legionellen und Legionellose*, Köniz: Bundesamt für Gesundheit.
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 28.06.2019. *Erneuerbare Energien: Wärmepumpen mit Prüf- / Effizienznachweis*. Eschborn: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.
- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 08.2016. *Österreichische Technologie-Roadmap für Wärmepumpen*, Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2019. *Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2018*, Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. Hrsg., 2015. *BWP-Branchenstudie 2015 - Szenarien und politische Handlungsempfehlungen*. Berlin: s.n.
- Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. Hrsg., 2018. *BWP Branchenstudie 2018: Marktanalyse – Szenarien – Handlungsempfehlungen*. Berlin: s.n.
- Danfoss, 09.2018. *Kältemittel - jetzt und in Zukunft*, s.l.: s.n.
- Dellios, A., Hubacher, P. & Guggenheim, G., 2018. *Wärmepumpen-System-Modul (WPSM) Jahresbericht 2018*, Bern: EnergieSchweiz.
- Deutsches Umweltbundesamt, 2016. *Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln*, Dessau-Roßlau: Deutsches Umweltbundesamt.
- Domanski, P. A., 2018. *Review of Refrigerants Evolution*. Valencia, s.n.
- Drück, H., 2016. *Leistungsprüfung und ökologische Bewertung von kombinierten Solar-Wärmepumpenanlagen: WPSol*, Stuttgart: Universität Stuttgart.
- EnergieSchweiz, 2018. *Heizungersatz durch Luft-Wasser-Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern*, Bern: EnergieSchweiz.
- Eschmann, M., 2018. *Qualitätsüberwachung von Kleinwärmepumpen und statistische Auswertung der Prüfergebnisse 2018*, Bern: Bundesamt für Energie.
- FEKA-Energiesysteme AG Bad Ragaz, kein Datum *Schulungsunterlagen Energie aus Abwasser*, s.l.: FEKA-Energiesysteme AG Bad Ragaz.

- Fischer, D. & Madani, H., 2017. *On heat pumps in smart grids: A review*, s.l.: ELSEVIER.
- FIZ Karlsruhe GmbH & Leibniz Institut für Informationsinfrastruktur, 2013. Elektrisch angetriebene Wärmepumpen - Aktuelle Ergebnisse aus Forschung und Feldtests. *Energieforschung kompakt*, Issue Themeninfo I /2013.
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2013. „WP Monitor“ *Feldmessung von Wärmepumpenanlagen*, Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- Henning, H.-M. & Palzer, A., 2013. *ENERGIESYSTEM DEUTSCHLAND 2050*, Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- Hubacher, P. & Bernal, C., 2015. *Feldmessungen an leistungsgeregelten Wärmepumpen und Warmwasser-Wärmepumpen*, Bern: Bundesamt für Energie.
- Kleefkens, O., 2018. *HPT Annex 46: Task 1 Legionella and Domestic Hot Water heat pumps*, s.l.: s.n.
- Longhini, M., 09.2015. *Next generation of refrigerants for residential heat pump systems*, s.l.: Tecnico Lisboa.
- Müller, A. et al., 12.2010. *Systeme zur Wärmebereitstellung und Raumklimatisierung im österreichischen Gebäudebestand: Technologische Anforderungen bis zum Jahr 2050*, Wien: s.n.
- Roost, M. et al., 2018. *WP-GAP: Performance Gap bei Mehrfamilienhäusern mit Wärmepumpe – die Rolle der Betreiber*, Bern: Bundesamt für Energie.
- SVGW / VSG, 2011. *Produkteschulung erdgasbetriebener Wärmepumpen*, s.l.: SVGW / VSG.
- The Boston Consulting Group und Prognos, 2018. *Klimapfade für Deutschland*, s.l.: s.n.
- Verein Energie Dialog Schweiz, kein Datum *Energie-Strategie 2050: Impulse für die schweizerische Energiepolitik*, Zürich: Verein Energie Dialog Schweiz.
- Vetsch, B., Gschwend, A. & Bertsch, S., 2012. *Warmwasserbereitstellung mittels Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern*, Bern: Bundesamt für Energie.
- Zweili, C., 4.11.2019. Mit Energie aus dem Bodensee könnte man 40 Prozent der Schweiz heizen. *Tagblatt*.

Anhang

Teil1:

Abbildung 4 zeigt die Systemgrenzen einer SW-Wärmepumpen-Anlage mit Raumheizung und Trinkwarmwasseraufbereitung. Die Effizienzkennziffern COP+, JAZ+, WNG+ und SNG+ beinhalten die Steuerung und sonstige Stromverbraucher (Ölumpfheizung, Abtauheizung, etc.). Der SNG als Systemnutzungsgrad beinhaltet auch die Speicherverluste des Trinkwarmwassers. Diese Kennziffer ist verbrauchsabhängig und wird in diesem Bericht nicht betrachtet.

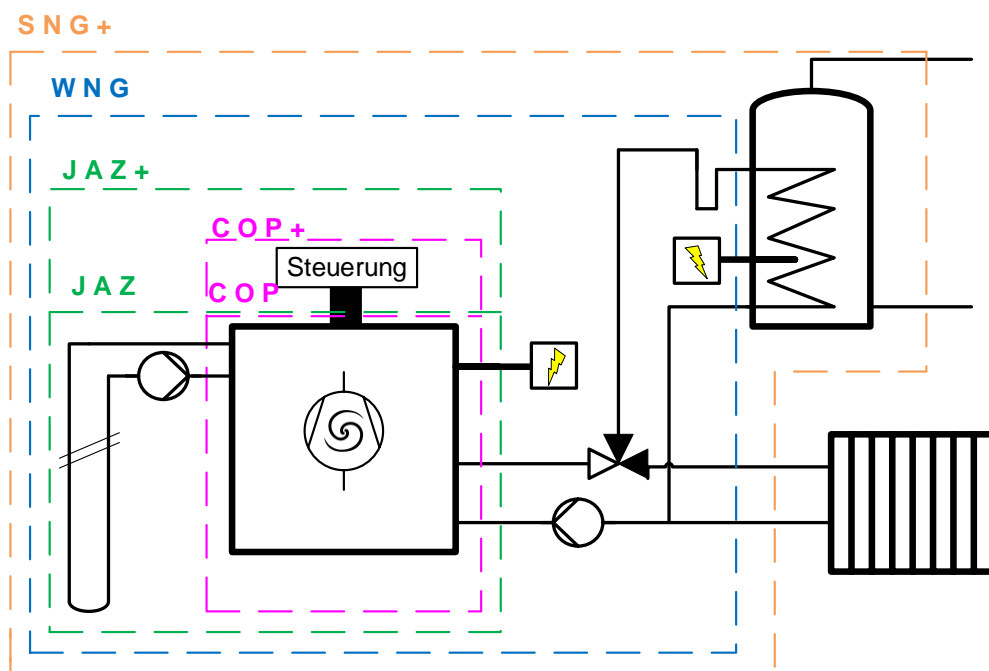


Abbildung 4: Systemgrenzen in der Wärmepumpen-Anlage und deren Kennziffern

Teil 2:

Definition von Nutzungsgraden von Wärmepumpen-Anlagen gemäss Angaben BFE