Stadt Zürich
Amt für Hochbauten

energie schweiz
Unser Engagement: unsere Zukunft.

Lucerne University of
Applied Sciences and Arts
HOCHSCHULE
LUZERN

Ville de Zurich – Office des bâtiments **Energie Schweiz** – Notre engagement notre avenir
Haute école de Lucerne – Université des sciences appliquées et des arts de Lucerne

07 | 2019

Pompes à chaleur air/eau
dans le parc urbain

Rapport final

Service
Technologie de l'énergie et du bâtiment

MENTIONS LÉGALES

Cliente :
Stadt Zürich (Ville de Zurich),
Amt für Hochbauten,
Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik,
Lindenhofstrasse 21
8021 Zurich

Un projet commun avec :
Energie Schweiz et la Haute école de Lucerne

Direction du projet :
Stefan Lutz
Service spécialisé de la technique de l'énergie et du bâtiment,
Office des bâtiments de la ville de Zurich

Auteur
Lukas Gasser
Alera energies AG
Hohenrainstrasse 36
6280 Hochdorf

Équipe du projet :
Dr. Roland Wagner (Office des bâtiments de la ville de Zurich)
Toni W. Püntener (Protection de l'environnement et de la santé, ville de Zurich)
Roger Hartl (Biens-fonds de la ville de Zurich)

Groupe de suivi :
Sven Ricman (Office des bâtiments, ville de Zurich)
Rita Kobler (Office fédéral de l'énergie)
Prof. Dr. Beat Wellig (Haute école de Lucerne)
Anna Joss (ancienne employée du Service d'urbanisme de la ville de Zurich)

Les visualisations 3D des bâtiments types examinés dans ce rapport ont été créées selon l'étude de projets virtuels par l'Office des bâtiments de Zurich. À cet égard, un remerciement tout particulier est adressé à M. Sven Ricman.

Télécharger au format PDF sur
www.stadt-zuerich.ch/bauen2000watt
> Bases et résultats de l'étude

Zurich, mai 2019

Vision de l'équipe du projet

Stefan Lutz, Dr. Roland Wagner, Roger Hartl, Toni W. Püntener

Le scénario d'efficacité du concept d'approvisionnement énergétique 2050 (CAE 2050) suppose une proportion de pompes à chaleur air-eau dans la fourniture de chaleur pour le chauffage des bâtiments et l'eau chaude de 12 % pour 2050. Les résultats du projet que nous soutenons montrent que des efforts supplémentaires considérables sont nécessaires à différents niveaux pour pouvoir atteindre cet objectif.

Les pompes à chaleur air-eau jouent un rôle important dans le CAE 2050, car les sondes géothermiques ne sont pas autorisées à divers endroits dans la ville de Zurich ou d'autres sources de chaleur, telles que les eaux lacustres ou fluviales, ne sont pas disponibles ou accessibles. Les pompes à chaleur air-eau sont alors le seul moyen de produire de la chaleur à faible émission. La faible proportion de tels systèmes aujourd'hui laisse présager des obstacles majeurs à la mise en œuvre en milieu urbain.

Le parc immobilier de la ville de Zurich comporte un grand nombre de bâtiments non rénovés de trois à quatre étages avec des besoins en puissance de chauffage de 50 à 100 kW environ. Près de 4 200 installations de combustion de cette gamme de puissance sont actuellement en service dans la ville en dehors des domaines de priorité et de coordination de la planification de l'approvisionnement énergétique ; soit à peine un cinquième de toutes les installations de combustion de la zone urbaine. Dans cette étude, trois bâtiments appartenant à la ville ont été examinés pour déterminer si et comment les pompes à chaleur air-eau peuvent être mises en œuvre selon différentes exigences d'ordre technique liées à la délivrance des permis de construire, en matière d'urbanisme et de bâtiment.

En conséquence, une étude détaillée des projets virtuels, chacune avec plusieurs variantes, a montré que les pompes à chaleur air-eau pouvaient être mises en œuvre dans tous les cas d'un point de vue technique. Un certain nombre d'obstacles sont apparus :

- Le remplacement d'un système de chauffage à énergie fossile (défectueux ou ancien) par un nouveau chauffage à énergie fossile est possible dans la plupart des cas, rapidement et sans des mesures d'envergure, et c'est souvent la solution la plus avantageuse. Le remplacement est souvent effectué directement par le fournisseur et nécessite une planification dans de très rares cas. Seul un processus d'approbation simplifié est requis.
- Le passage à un système de pompe à chaleur (air-eau) pour les bâtiments existants dans la gamme de puissance examinée de 40 à 100 kW nécessite dans tous les cas un processus de planification qui concerne généralement plusieurs domaines de spécialité. Un permis de construire est également requis pour certaines des variantes. La planification et l'approbation sont un processus de longue haleine ; un changement de situation vers une solution de pompe à chaleur n'est guère possible.
- En présence de nombreux biens immobiliers urbains de plusieurs étages, il y a peu ou pas de place disponible pour une installation extérieure d'une pompe à chaleur ou d'un échangeur de chaleur. En revanche, une installation sous ou sur le toit entraîne souvent des restrictions pour les résidents (transformation de la chape ou du toit utilisable) ; cela s'applique également en partie aux variantes avec la pompe à chaleur disposée au sous-sol. L'installation d'une pompe à chaleur sous le toit peut éventuellement empêcher l'agrandissement de la chape à usage résidentiel, ce qui est économiquement intéressant pour le propriétaire.
- Dans les bâtiments de cette taille, il est généralement nécessaire d'agrandir le raccordement électrique si une pompe à chaleur est installée.
- Non seulement en raison des conditions spatiales, mais également des besoins en

énergie, en particulier dans les bâtiments à consommation d'énergie particulièrement élevée, les variantes avec une production de chaleur supplémentaire (principalement pétrole/gaz) en mode de fonctionnement bivalent-parallèle devraient être examinées à titre de solution transitoire.

Toutefois, dans le cadre des processus du projet, des solutions pourraient également être présentées :

- En raison des nombreux plans de projet virtuels, un schéma de solution simple a pu être mis au point, qui montre également des solutions de remplacement aux fournisseurs et maîtres d'ouvrages avant l'étude du projet. Grâce à cet outil, il est même possible de vérifier à un stade précoce si le remplacement d'une installation de combustion fossile par une pompe à chaleur air-eau est envisageable, voire de préparer éventuellement des mesures appropriées pour une conversion de sorte à ne pas exclure, en cas de défaillance du système de chauffage à énergies fossiles, la transition vers une production de chaleur renouvelable.
- Le schéma de solution simple peut montrer au fournisseur du système de chauffage quels autres types de travaux sont nécessaires lors du changement de source d'énergie. Par conséquent, il peut être conseillé aux propriétaires ou aux fournisseurs d'acquérir les connaissances techniques nécessaires.
- Contrairement aux petites maisons individuelles dotées de suffisamment d'espace extérieur, le coût d'installation d'une pompe à chaleur air-eau dans les grands bâtiments existants est nettement plus élevé. Le coût de la pompe à chaleur ne représente qu'une fraction des coûts totaux, qui comprennent des mesures structurelles, statiques, de protection contre le bruit, souvent un agrandissement du raccordement électrique et bien plus encore. Le coût des investissements est 2,5 à 4 fois supérieur au coût de remplacement direct du chauffage par des sources d'énergies fossiles. En fonction du tarif de l'électricité, le coût du capital plus élevé ne peut pas être compensé par des coûts d'exploitation réduits. De toute évidence, l'aide financière aux pompes à chaleur air-eau dans la ville de Zurich via les contributions à hauteur de 2000 watts du Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz) n'est pas suffisamment attractive pour convaincre les propriétaires de passer à une pompe à chaleur air-eau. Les études de projets élaborées en détail dans ce rapport donnent une base précieuse pour le calcul des contributions correspondantes aux subventions. Les résultats du projet fournissent des informations sur la manière dont les cantons, et éventuellement les communes, peuvent concevoir des incitations financières et autres pour les pompes à chaleur air-eau.
- Comme prévu, les obstacles majeurs sont les exigences en matière d'urbanisme ou de conservation des monuments, ainsi que les conditions en matière de protection contre le bruit. Il est difficile de comprendre pourquoi l'installation extérieure d'échangeurs de chaleur à air à des fins de refroidissement, par exemple à usage industriel, est possible sans autre formalité dans les zones de protection, mais les mêmes installations à des fins de chauffage ne peuvent pas être autorisées. Compte tenu des exigences de protection du climat, il est nécessaire de fixer des priorités claires en faveur de cette solution décentralisée pour un approvisionnement en chaleur durable, y compris dans l'évaluation et l'autorisation émanant des autorités urbaines.

Matrice des variantes étendue (basée sur le schéma 49 à la page 78). De plus, trois anneaux extérieurs avec les zones centrales d'attributions de zones (KEZ), les zones de conservation de quartiers (QEZ) et les zones résidentielles (WOZ) ont été présentés. Les couleurs des feux de signalisation montrent comment les perspectives d'autorisation doivent être évaluées actuellement, en tenant compte des aspects du patrimoine architectural pour les composants des pompes à chaleur air-eau installées à l'extérieur : du vert, généralement possible, à l'orange, si les conditions sont favorables, au rouge, les permis ne sont généralement pas délivrés).

- L'offre de pompes à chaleur air-eau jusqu'ici n'est que partiellement adaptée à une utilisation répandue dans les immeubles locatifs existants avec des besoins en chaleur de 40 à 100 kW. En plus d'améliorer la protection contre le bruit, des appareils compacts avec un rendement énergétique le plus élevé possible en service sont nécessaires. Il convient de porter une attention particulière au montage. Cela concerne les poids des installations et les dimensions extérieures à la fois sur le site et sur les voies d'accès dans le bâtiment.

Vision de SuisseEnergie

Lors de la construction de nouveaux immeubles locatifs, des sources d'énergies renouvelables sont utilisées pour le chauffage et l'eau chaude dans neuf cas sur dix. Si le système de chauffage est remplacé par exemple, au cours de travaux de transformation/d'un remplacement, cette valeur tombe en dessous de 40 %. Cela se voit également dans les chiffres de vente des différents équipements de chauffage. En 2018, plus de 10 000 équipements de chauffage au fioul et au gaz de l'ordre de 20 à 100 kW ont été vendus, mais pas même 5 000 pompes à chaleur/chauffage au bois dans la même classe de performance (y compris les bâtiments neufs). La décarbonisation de la fourniture de chaleur des immeubles locatifs existants est à peine en cours.

Cette étude montre clairement plusieurs faits :

- Le potentiel de réduction du CO2 grâce à un changement de système de chauffage est généralement élevé dans les immeubles locatifs, car la majorité d'entre eux sont chauffés avec des sources d'énergies fossiles. Le passage à un système de pompe à chaleur réduit aussi de manière considérable l'impact environnemental.
- Les solutions techniques sont disponibles, mais le changement de système conduit à un projet de construction et nécessite donc plus de temps (de préparation), plus de personnel qualifié et plus de moyens financiers, car des conditions supplémentaires doivent être satisfaites.
- L'installation de la pompe à chaleur dans le grenier ou sur le toit est, dans de nombreux cas, la seule option dans les zones urbaines en raison de l'étroitesse de l'espace disponible. Toutefois, si des renforcements statiques doivent être réalisés, leurs coûts dépassent les subventions reçues pour la pompe à chaleur (si des subventions sont accordées, ce qui n'est pas prévu dans tous les cantons).
- Les locataires vivent dans plusieurs de ces logements urbains. Si la taxe CO2 s'élève à 210 CHF/tonne, d'après le message du Conseil fédéral sur la nouvelle loi sur le CO2, le calcul de la rentabilité ne changera pas du point de vue du propriétaire d'un bien immobilier tant que les logements urbains sont rares et que les locataires supportent les frais annexes les plus élevés. Avec le droit locatif actuel, la taxe d'incitation ne conduit pas au contrôle souhaité.

Nous suivons ces évolutions du point de vue de SuisseEnergie :

- Il y a un besoin urgent de nouvelles exigences légales afin que des alternatives aux sources d'énergies fossiles soient absolument examinées. Le changement de système est trop peu attrayant par rapport au remplacement 1 : 1.
- Des réglementations de construction claires sont également requises. Le principe « aussi peu que possible, mais autant que nécessaire » est fondamental pour faire avancer la décarbonisation à la vitesse nécessaire. Si une demande de construction répond à ces réglementations, l'autorité compétente en matière d'autorisation concernée doit délivrer le permis de construire rapidement et à moindres frais. La sécurité de la planification augmente la volonté d'investir et avec des procédures simplifiées pour les solutions prioritaires, les autorités compétentes en matière de permis de construire mettent au point des incitations compréhensibles et opérationnelles. Aujourd'hui, différentes réglementations dans le domaine de la protection des monuments ou de la protection contre le bruit empêchent le changement de système de façon globale, comme le montre l'étude de la ville de Zurich. Cela freine l'innovation et la recherche de solutions acceptables. Il est difficile de comprendre pourquoi des règles différentes s'appliquent aux installations frigorifiques et aux pompes à chaleur. Le remplacement du chauffage à énergie

fossile présente un intérêt public en raison des objectifs fixés dans la politique climatique. Nous avons besoin de ces réductions d'émissions.

- Afin de définir les incitations adéquates, les procédures d'autorisation des différents systèmes de chauffage doivent être comparables en termes de coûts. L'autorisation d'un changement de système en pompe à chaleur demande aujourd'hui beaucoup de temps et coûte énormément d'argent. Dans de nombreux cantons, les chaudières peuvent être remplacées avec peu d'efforts administratifs. Il s'agit d'un obstacle psychologique et économique majeur qui doit être corrigé.
- Les autorités politiques du gouvernement fédéral, des cantons et des communes sont sollicitées. Par exemple, elles devraient se demander si le montant des subventions cantonales ou communales pourrait être lié aux frais de construction en utilisant des critères simples.

Contenu

Vision de l'équipe du projet 3
Vision de SuisseEnergie 6
Contenu 4
Dégagement de responsabilité 7
1 Synthèse du rapport 8
Situation de départ 8
Objectifs 8
Processus 9
Recherche de solutions déjà mises en œuvre 9
Situation du marché et exigences relatives aux pompes à chaleur air-eau adaptées à la ville 10
Solutions standard : intégration technique des pompes à chaleur air-eau en milieu urbain 11
Étude de projets virtuels et recommandations 14
Recommandations pour le processus de remplacement du chauffage par des pompes à chaleur air-eau en milieu urbain 16
Pratique en matière d'autorisations des pompes à chaleur air-eau en milieu urbain 17
Conclusion et action ultérieure 18
2 Point de départ et objectif 20
3 Bases 23
3.1 Méthodes de construction des pompes à chaleur 23
3.1.1 Pompes à chaleur compactes pour une installation intérieure 23
3.1.2 Pompes à chaleur compactes pour une installation extérieure 24
3.1.3 Pompes à chaleur split 24
3.2 Modes de fonctionnement des pompes à chaleur - fonctionnement monovalent opposé à bivalent 25
3.2.1 Mode de fonctionnement monovalent 26
3.2.2 Mode de fonctionnement bivalent 26
4 Analyse du marché 29
4.1 Produits standard 29
4.1.1 Installations standard - principales caractéristiques/données techniques 29
4.1.2 Installations standard - évaluation 31
4.2 Installations spécifiques 34
4.3 Exemples d'installations standard et spécifiques 35
4.4 Tendances de développement 38
5 Recherches complémentaires 39
5.1 Bureaux d'études 39
5.2 Institutions, autorités et administrations 41
6 Solutions existantes 42
6.1 Projets pilotes 42
6.1.1 Chauffage et refroidissement des logements dans les combles des anciens bâtiments viennois à l'aide de pompes à chaleur air-eau 42
6.1.2 Projet pilote de la ville de Genève - pompes à chaleur extérieures standard 43
6.1.3 Résidence médicalisée LAK à Mauren - pompe à chaleur spécifique installée sous le toit 45

6.1.4 École Geschwister Scholl - Pompes à chaleur standard installées sous le toit 47
6.1.5 Altmarkt-Galerie à Dresde 47
6.1.6 Système de climatisation du Palais fédéral à Berne 48
6.1.7 Autres projets de l'étude menée par Energie Schweiz 2018 49
6.2 Synthèse des solutions existantes 53
6.2.1 Grille morphologique. Caractéristiques des systèmes mis en œuvre 54
6.2.2 Caractéristique A - installation extérieure dans le jardin, pompes à chaleur compactes standard, fonctionnement monovalent, chauffage complet du bâtiment 55
6.2.3 Caractéristique B - installation intérieure au sous-sol, pompes à chaleur compactes standard, fonctionnement monovalent ou bivalent parallèle, chauffage complet du bâtiment 55
6.2.4 Caractéristique C - installation intérieure sous le toit, pompes à chaleur standard en version compacte ou split, fonctionnement monovalent ou bivalent parallèle, chauffage complet du bâtiment 55
6.2.5 Caractéristique D - installation intérieure sous le toit, pompes à chaleur spécifiques en version split, fonctionnement monovalent ou bivalent parallèle, chauffage complet du bâtiment 56
6.2.6 Caractéristique E - installation extérieure sur le toit, pompe à chaleur compacte standard, fonctionnement monovalent ou bivalent parallèle, chauffage complet ou partiel du bâtiment 56
7 Bâtiments types de la ville de Zurich 57
7.1 Rue Hofwiesenstrasse 126 57
7.2 Rue Müllerstrasse 34 58
7.3 Rue Kruggasse 8 59
8 Solutions déduites et exigences en matière de pompes à chaleur 61
8.1 Objectif 61
8.2 Aspects d'optimisation technique 61
8.2.1 Utilisation d'installations standard 61
8.2.2 Mise en cascade de plusieurs pompes à chaleur plus petites 61
8.2.3 Mode de fonctionnement monovalent par opposition à bivalent des pompes à chaleur 62
8.3 Aspects de l'optimisation en termes de conception 64
8.3.1 Solution 1 - Installation de la pompe à chaleur dans le jardin/à l'extérieur 64
8.3.2 Solution 2 - Installation de la pompe à chaleur au sous-sol/rez-de-chaussée 66
8.3.3 Solution 3 – installation de la pompe à chaleur au grenier 68
8.3.4 Solution 4 - Installation de la pompe à chaleur sur le toit - version split 71
8.3.5 Solution 5 - Installation de la pompe à chaleur sur le toit - version compacte 74
9 Recommandations en termes d'étude de projets 78
9.1 Matrice des variantes pour le test d'adéquation et la recherche de solutions 78
9.2 Liste de questions supplémentaires pour l'étude de projets 85
9.2.1 Questions générales 85
9.2.2 Liste des questions pour la solution 1 85
9.2.3 Liste des questions pour la solution 2 86
9.2.4 Liste des questions pour la solution 3 86
9.2.5 Liste des questions pour les solutions 4 et 5 86
10 Études de projets virtuels 87
10.1 Rue Hofwiesenstrasse 126 87
10.1.1 Situation 87
10.1.2 Étude de projets, solution 1 – Installation dans le jardin – Mode monovalent après la rénovation 94
Coûts d'investissement 100
Coûts annuels 102

10.1.3 Étude de projets, solution 2 – installation au sous-sol – monovalent après la rénovation 103
Coûts d'investissement 108
Coûts annuels 110
10.1.4 Étude de projets, solution 3 – installation dans le grenier – monovalente après la rénovation 111
Coûts annuels 118
10.1.5 Bilan de l'étude de projets, rue Hofwiesenstrasse 126 119
10.2 Rue Müllerstrasse 34 121
10.2.1 Situation 121
10.2.2 Étude de projets, solution 2 – installation au sous-sol – bivalent 127
Coûts annuels 134
10.2.3 Étude de projets, solution 4 – installation extérieure sur le toit – version split – mode bivalent 135
Coûts d'investissement 140
Coûts annuels 142
10.2.4 Étude de projets, solution 4 – installation extérieure sur le toit – version split – mode monovalent 143
Coûts annuels 151
10.2.5 Étude de projets, solution 5 – installation sur toit version compacte – mode bivalent 152
Coûts annuels 159
10.2.6 Étude de projets, solution 5 – Installation sur le toit version compacte – mode monovalent 160
Coûts annuels 167
10.2.7 Bilan de l'étude de projet rue Müllerstrasse 34 168
10.3 Rue Kruggasse 8 171
10.3.1 Situation 171
10.3.2 Étude de projets, solution 4 - Installation sur le toit, version split 176
Coûts annuels 183
10.3.3 Bilan de l'étude de projets rue Kruggasse 8 184
Liste des schémas 185
Liste des tableaux 194
Bibliographie 196
Annexe 1 : Aperçu des fabricants de pompes à chaleur, à partir de 2017/18 199 198
Annexe 2 : Calcul de la puissance électrique Hofwiesenstrasse 126, actuellement 202 198
Annexe 3 : Calcul de la puissance électrique Hofwiesenstrasse 126, renforcée 203 198
Annexe 4 : Preuve de la protection contre le bruit à la Hofwiesenstrasse 126, solution 1 204 198
Annexe 5 : Schéma hydraulique Hofwiesenstrasse 126, solution 1 205 198
Annexe 6 : Schéma hydraulique Hofwiesenstrasse 126, solution 2 206 198
Annexe 7 : Schéma hydraulique Hofwiesenstrasse 126, solution 3 207 198
Annexe 8 : Calcul des coûts Hofwiesenstrasse 126, variante d'huile 208 198
Annexe 9 : Calcul de la puissance électrique Müllerstrasse 34, actuellement 209 198
Annexe 10 : Calcul de la puissance électrique Müllerstrasse 34, renforcée 210 198
Annexe 11 : Schéma hydraulique Müllerstrasse 34, solution 2 bivalent 211 198
Annexe 12 : Schéma hydraulique Müllerstrasse 34, solution 4 bivalent 212 198
Annexe 13 : Schéma hydraulique Müllerstrasse 34, solution 4 monovalent 213 198
Annexe 14 : Schéma hydraulique Müllerstrasse 34, solution 5 bivalent 214 198
Annexe 15 : Schéma hydraulique Müllerstrasse 34, solution 5 monovalent 215 198
Annexe 16 : Calcul des coûts à la Müllerstrasse 34, variante gaz 216 198

Annexe 17 : Calcul de la puissance électrique Kruggasse 8, actuellement 218.....198
Annexe 18 : Schéma hydraulique, Kruggasse 8, solution 4 219 198
Annexe 19 : Calcul des coûts Kruggasse 8, variante gaz et biogaz 220 198
Annexe 20 : Comparaison des variantes - données de base 221.....198
Annexe 21 : Financement d'un exemple de planification de projet 222 198
Annexe 10 : Calcul de la puissance électrique Müllerstrasse 34, renforcée.....210
Annexe 11 : Schéma hydraulique, rue Müllerstrasse 34, solution 2 bivalente.....211
Annexe 18 : Schéma hydraulique, rue Kruggasse 8, solution 4 220
Annexe 19 : Calcul des coûts Kruggasse 8, variante gaz et biogaz.....221
Synthèse des subventions/aides :.....224
Base de calcul : subventions pour Hofwiesenstrasse 126 225

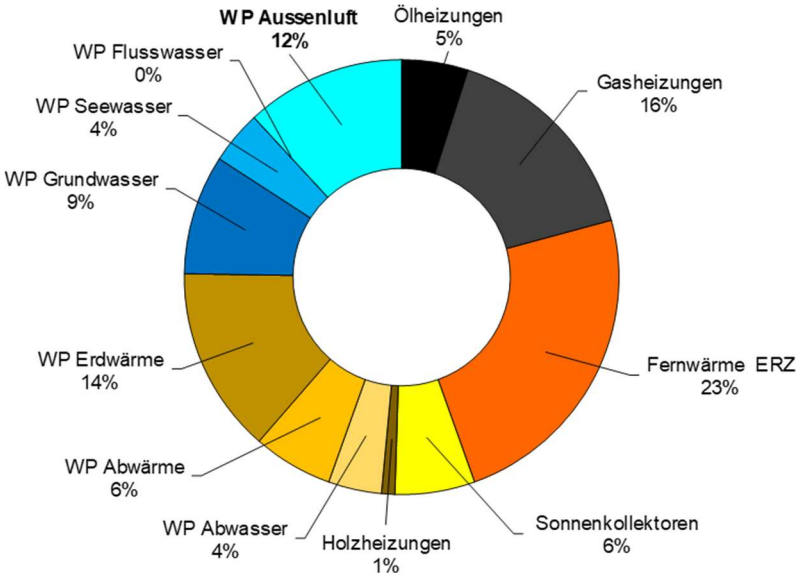
Dégagement de responsabilité

Dans certains cas, des produits et des marques spécifiques sont désignés dans cette étude et utilisés dans les études de projets types. Tous les produits mentionnés peuvent être remplacés par des produits et des marques de même valeur.

1 Synthèse du rapport

Situation de départ

Dans le scénario d'efficacité, le concept d'approvisionnement énergétique 2050 de la ville de Zurich prévoit une proportion de pompes à chaleur air-eau dans la fourniture des besoins en chaleur pour le chauffage des bâtiments et l'eau chaude de 12 % environ en 2050. En revanche, la proportion actuelle des pompes à chaleur air-eau n'est que d'environ 1 %.



Prévisions de la répartition en pourcentage des systèmes utilisés dans la ville de Zurich en 2050 pour la fourniture de chauffage des bâtiments et d'eau chaude. (Source : Rapport de planification de l'approvisionnement énergétique, ville de Zurich [1], correspond au schéma 1, page 20)

Dans le segment des pompes à chaleur air-eau, les fabricants proposent désormais des produits standard d'une puissance de chauffage allant jusqu'à 35 kW environ, qui peuvent répondre aux strictes exigences en matière d'efficacité et d'émissions sonores. Toutefois, dans les zones à forte densité de population, l'installation de pompes à chaleur air-eau pour utiliser l'air ambiant comme source de chaleur à l'extérieur est complexe dans de nombreuses situations. D'une part, des exigences strictes en matière d'émissions sonores doivent être respectées, d'autre part, l'espace disponible dans les zones du centre-ville est dans la plupart des cas très limité. Dans ce contexte, les pompes à chaleur air-eau extérieures classiques sont exclues comme source d'énergie renouvelable dans de nombreuses zones.

Objectifs

La question de savoir si l'objectif pour 2050 de fournir 12 % de l'énergie finale pour le chauffage des bâtiments et l'eau chaude avec des pompes à chaleur air-eau peut être atteint dépend en grande partie de la question de savoir si ces systèmes peuvent également être utilisés dans des zones à forte densité de population dans des conditions spatiales difficiles. Cette étude vise à montrer si et comment l'objectif peut être atteint avec des solutions planifiées et techniques correspondantes.

L'objectif est d'étudier et de montrer quelles exigences en matière de conception, d'urbanisme et de protection de l'environnement des autorités rendent l'installation de pompes à chaleur air-eau dans les zones urbaines difficile, voire impossible.

Les résultats et les conclusions concernant la planification et la mise en œuvre de pompes à chaleur air-eau dans les bâtiments existants dans les zones urbaines doivent être recueillis et consignés dans un rapport. Le but est de favoriser et de simplifier la future distribution des pompes à chaleur air-eau.

Processus

Dans le cadre de recherches et d'une analyse de marché détaillées, des solutions appropriées et déjà mises en œuvre pour l'intégration des pompes à chaleur air-eau dans les zones urbaines ont été identifiées, compilées et évaluées. Dans un second temps, trois bâtiments du portefeuille de la ville de Zurich ont été sélectionnés pour un examen approfondi avec des études de projets virtuels de grande envergure. Sur la base des conclusions des recherches et de l'analyse de marché, des solutions appropriées pour l'intégration des pompes à chaleur air-eau dans les bâtiments urbains ont été mises au point et ont été examinées sous l'angle de l'efficacité énergétique, de la protection contre le bruit, en termes d'aspects de la conception et de coûts. Pendant toute la mise au point de la solution, les valeurs d'efficacité réalisables avec le concept de solution respectif ainsi que les coûts de mise en œuvre et d'exploitation attendus du système ont été calculés en continu afin de permettre la mise en œuvre de systèmes rentables sur le plan économique et écologique. Sur la base des conclusions de l'étude de projets virtuels, une matrice des variantes détaillée a été élaborée pour vérifier l'adéquation de chaque bâtiment pour utiliser des pompes à chaleur air-eau comme principal générateur de chaleur. La matrice des variantes contient toutes les caractéristiques pertinentes du bâtiment et peut à l'aide de diverses questions montrer si le bâtiment est adapté à la rénovation du chauffage moyennant une pompe à chaleur air-eau et quelles solutions peuvent être utilisées de manière avantageuse.

Recherche de solutions déjà mises en œuvre

Au cours de recherches détaillées, diverses solutions pouvant être considérées comme de « bons modèles » et ayant déjà été mises en œuvre avec succès ont pu être identifiées. Un grand nombre de solutions, déjà utilisées et mises en œuvre, reposent sur l'utilisation de pompes à chaleur spéciales relativement onéreuses, chacune d'elles ayant été conçue et fabriquée pour l'application spécifique. En revanche, un certain nombre de projets ont déjà été mis en œuvre à l'aide de pompes à chaleur standard disponibles sur le marché, ce qui montre qu'avec une planification correcte, des systèmes avec des composants actuellement disponibles peuvent être mis en œuvre.

Dans bon nombre de projets pilotes évalués, les pompes à chaleur air-eau ont été installées sur le toit ou dans le grenier du bâtiment. Un conflit peut cependant survenir, car ces surfaces conviendraient aussi la plupart du temps à d'autres usages (usages résidentiels, toits plats extérieurs utilisables, remises). Des pompes à chaleur spéciales étaient souvent utilisées, notamment dans les projets où les pompes à chaleur étaient installées dans le grenier. En revanche, les pompes à chaleur standard étaient principalement utilisées pour l'installation sur le toit. Tous les projets dans lesquels les pompes à chaleur ont été installées dans le grenier du bâtiment se caractérisent notamment par la visibilité minimale du système, mais en même temps par des coûts de mise en œuvre plus élevés.

Dans plusieurs projets, les pompes à chaleur air-eau intégrées ne sont pas utilisées pour chauffer l'ensemble du bâtiment, mais exclusivement pour le chauffage partiel du bâtiment, par exemple les combles. Cette mesure peut faciliter considérablement l'utilisation des pompes à chaleur air-eau du fait de la réduction de la puissance thermique requise, mais elle ne serait pas une solution suffisamment rentable pour mettre en œuvre le concept « Approvisionnement énergétique 2050 ». Une autre mesure souvent mise en œuvre pour réduire la puissance thermique requise des pompes à chaleur est l'utilisation d'un fonctionnement bivalent combiné avec des générateurs de chaleur, principalement avec des sources d'énergies fossiles. Toutes les études de projets montrent que le fonctionnement bivalent conduit à des pompes à chaleur d'une puissance thermique inférieure. Cela facilite l'utilisation des pompes à chaleur, car, entre autres, cela réduit considérablement les dimensions et les poids des systèmes, mais aussi les émissions sonores qui en résultent et la

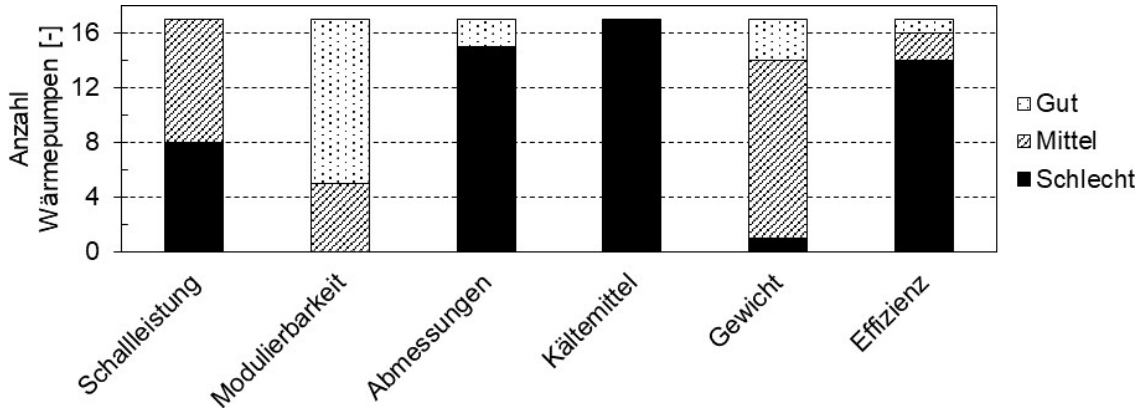
consommation électrique des pompes à chaleur. Cependant, en raison de la part d'énergie fossile résiduelle dans la distribution de chaleur, les modes de fonctionnement bivalents de ce type ne sont possibles qu'à titre de solutions intermédiaires à court et à moyen terme.

Les projets pilotes qui ont déjà été mis en œuvre ont fourni des conclusions importantes concernant la déduction de solutions appropriées et généralement applicables pour l'utilisation de pompes à chaleur air-eau en milieu urbain, à la fois d'un point de vue technique et conceptuel.

Situation du marché et exigences relatives aux pompes à chaleur air-eau adaptées à la ville

L'analyse de marché réalisée montre qu'actuellement, seuls quelques produits standard répondent aux strictes exigences imposées aux pompes à chaleur air-eau destinées à être utilisées en milieu urbain. Seules quelques-unes des pompes à chaleur air-eau standard évaluées satisfont aux strictes exigences en termes d'efficacité et d'émissions sonores. La plupart des pompes à chaleur standard disponibles échouent notamment en raison de niveaux de puissance acoustique trop élevés. L'analyse de marché montre également que de nombreuses installations standard disponibles ont de grandes dimensions et des poids élevés. Tant les dimensions que le poids des pompes à chaleur air-eau peuvent rendre l'installation dans les bâtiments existants beaucoup plus difficile, voire impossible.

En revanche, les discussions avec les fabricants de pompes à chaleur spéciales confirment que la fabrication de pompes à chaleur air-eau à haut rendement tout en ayant des niveaux de puissance acoustique très faibles est tout à fait possible. Pour ces raisons, les solutions utilisées actuellement se limitent pour la plupart à des installations spécifiques relativement onéreuses. Cependant, pour une mise en œuvre simple et économique des pompes à chaleur air-eau dans les zones urbaines, des solutions standard sont essentielles.



Évaluation des installations standard examinées (voir schéma10, page 33)

Les critères importants concernant les futures installations standard à utiliser en milieu urbain comprennent, entre autres, de faibles émissions sonores, une bonne efficacité énergétique, de petits gabarits et un poids léger. Les produits modulaires et « pouvant être mis en cascade » présentent des avantages évidents en termes de faisabilité en milieu urbain. Les exigences les plus importantes concernant les pompes à chaleur air-eau utilisées dans les bâtiments urbains existants peuvent être résumées comme suit :

- Petites dimensions
- Poids léger
- Conception modulaire
- « Mise en cascade » facile de plusieurs pompes à chaleur (adaptation aux besoins de puissance thermique en fonction de la température extérieure)
- Atteinte de températures de flux élevées (60 °C @ A-10 °C)
- Découplage des bruits de structure dans l'appareil autant que possible
- Faible niveau de puissance acoustique

- Valeurs d'efficacité énergétique élevées
- Courants de démarrage les plus bas possibles (démarrage en douceur ou convertisseur de fréquence)
- Utilisation de réfrigérants à faible potentiel d'effet de serre (faible potentiel de réchauffement de la planète)

Les fabricants de pompes à chaleur sont censés tenir compte de ces exigences lors de la mise au point de futurs produits. Le marché émergent représente une opportunité pour le secteur des pompes à chaleur qui doit être saisie avec la mise au point de produits adaptés.

Solutions standard : intégration technique des pompes à chaleur air-eau en milieu urbain

Sur la base des conclusions de l'étude de marché et de la recherche de solutions et de projets pilotes déjà existants, des solutions fondamentales pour l'utilisation de pompes à chaleur air-eau dans les bâtiments urbains ont été élaborées. Lors de l'élaboration des solutions, il a été systématiquement veillé à ce que les objectifs suivants, qui sont d'une grande pertinence concernant la future distribution de pompes à chaleur air-eau dans les zones urbaines, puissent être atteints au mieux.

- Haute efficacité énergétique avec de faibles émissions sonores
- Haute sécurité d'exploitation avec de faibles émissions sonores
- Facile à mettre en œuvre (peu d'espace requis, facile à installer)
- Fonctionnement le plus économique possible
- Minimisation des interventions dans l'aspect du bâtiment.

L'atteinte des objectifs énoncés nécessite des optimisations techniques et conceptuelles approfondies en relation avec la conception et l'installation des systèmes de pompe à chaleur.

Concernant la faisabilité et la rentabilité, les aspects d'optimisation technique suivants sont considérés comme utiles et pertinents :

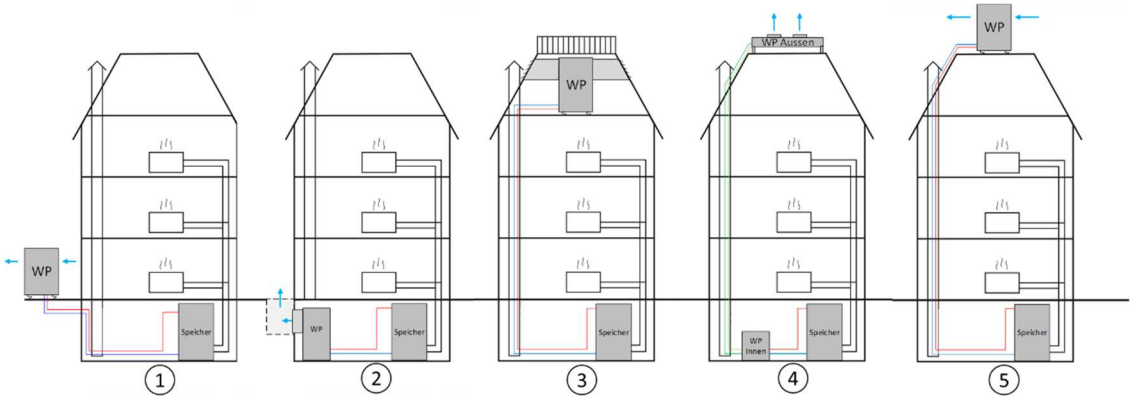
- Utilisation d'installations standard à la place d'installations spécifiques
- « Mise en cascade » de plusieurs petites pompes à chaleur au lieu d'une grande pompe à chaleur
- Fonctionnement bivalent-parallèle au lieu du fonctionnement monovalent de la pompe à chaleur, limité aux phases de transition à court et à moyen terme.

Concernant le coût des investissements, les études montrent que les produits standard sont nettement plus avantageux à l'achat que les installations spécifiques. L'utilisation d'installations standard au lieu d'installations spécifiques peut également avoir un effet positif sur les coûts de planification. Des installations spécifiques sont mises au point et fabriquées en fonction des besoins et des différentes spécifications, ce qui nécessite une planification et une communication intensives entre les urbanistes, les fabricants et les entreprises chargées de la mise en œuvre. En revanche, les pompes à chaleur standard peuvent être sélectionnées dans le catalogue avec relativement peu d'effort, ce qui permet une planification plus simple et plus efficace. Un autre avantage de l'utilisation d'installations standard peut être la sécurité de fonctionnement éventuellement accrue des installations standard grâce à des processus de production standardisés.

Au lieu d'une grosse pompe à chaleur, plusieurs appareils standard plus petits et plus légers sont « mis en cascade » de manière avantageuse pour faciliter l'installation des appareils. Grâce à cette mesure, la pose est non seulement facilitée, mais augmente également la flexibilité concernant l'installation des appareils dans ou sur le bâtiment. Un autre avantage de l'utilisation de plusieurs pompes à chaleur « en cascade » peut être la sécurité de fonctionnement accrue résultant de la redondance (partielle).

Quelle que soit la solution conceptuelle en question, les pompes à chaleur peuvent fournir un chauffage monovalent de l'ensemble du bâtiment ou alternativement couplé à un système de chauffage supplémentaire, un chauffage bivalent du bâtiment. En mode de fonctionnement bivalent, la pompe à chaleur peut être dimensionnée environ 50 % plus petite en termes de puissance thermique par rapport à un mode de fonctionnement monovalent. Malgré cette mesure, en fonction des conditions climatiques, plus de 80 % de l'énergie thermique annuelle nécessaire au chauffage et à l'eau chaude peuvent être fournis par la pompe à chaleur pendant la saison de chauffage. Une conception bivalente de la pompe à chaleur peut ainsi non seulement atténuer le problème des émissions sonores de la pompe à chaleur, mais permet également une pose et une installation simplifiées grâce à ses dimensions plus petites et son poids réduit. Un autre avantage du mode de fonctionnement bivalent des pompes à chaleur est la sécurité de fonctionnement accrue qui en résulte en raison de la redondance partielle. Les systèmes de chauffage bivalents avec pompes à chaleur peuvent également présenter un intérêt si l'alimentation électrique du bâtiment limite la puissance maximale de la pompe à chaleur et que l'expansion de l'alimentation électrique n'est pas possible ou implique des coûts d'investissement élevés. La mise en œuvre d'un double mode de fonctionnement des pompes à chaleur peut donc représenter une mesure judicieuse pour améliorer la faisabilité technique et économique, notamment avec une infrastructure gazière ou pétrolière existante. Une fois l'enveloppe du bâtiment rénovée, un mode de fonctionnement monovalent devrait également être possible. Si les sources d'énergies fossiles sont utilisées en mode de fonctionnement bivalent, ces solutions doivent être considérées uniquement comme des solutions transitoires à court et à moyen terme.

Concernant la faisabilité des systèmes de pompe à chaleur air-eau dans les bâtiments urbains existants, des optimisations non seulement techniques et économiques, mais également conceptuelles doivent être effectuées. En particulier concernant un éventuel statut de protection du bâtiment, il est important de réduire au minimum les interventions dans la structure et l'aspect du bâtiment. Dans ce contexte, cinq solutions pour l'installation des pompes à chaleur ont été élaborées, lesquelles visent à réduire la visibilité des composants techniques ; cependant, il convient d'éviter des coûts élevés inutiles pour la mise en œuvre des systèmes.



Représentation schématique des solutions 1 à 5.

La solution 1 correspond à une installation extérieure classique de pompes à chaleur air-eau. Des pompes à chaleur compactes ou séparées peuvent être utilisées. Cela est dû à des surfaces de terrain et de jardin limitées ou à des dispositions légales.

La solution 2 est basée sur l'installation intérieure de pompes à chaleur compactes dans la cave du bâtiment. Cette solution peut être particulièrement intéressante s'il y a suffisamment d'espace disponible au sous-sol et que les pièces du sous-sol ne sont pas habitables (pas comme indiqué sur l'image), de sorte qu'aucun puits de lumière ne soit créé pour l'entrée et la sortie d'air pour le fonctionnement de la pompe à chaleur.

La solution 3 est basée sur l'installation intérieure de pompes à chaleur compactes au grenier du bâtiment. Cette solution peut être utilisée si la mise en œuvre des solutions 1 et 2 n'est pas possible et si des exigences strictes en matière de visibilité du système, par ex. en raison de toute exigence en termes de patrimoine architectural. L'air ambiant est aspiré et soufflé à travers des conduits d'air de grande section transversale, insonorisés et isolés thermiquement et des cavités dimensionnées de façon généreuse dans les surfaces de toiture. Les cavités dans les surfaces de toiture peuvent être dotées de grilles de protection contre les intempéries de la même couleur que la toiture afin qu'elles ne puissent pas être vues comme des ouvertures de l'extérieur. Cette solution impose des exigences strictes concernant la statique du bâtiment et peut rendre nécessaires des améliorations statiques de la situation dans la zone de toiture. De plus, une situation concurrentielle peut survenir si les combles peuvent être agrandis à des fins résidentielles ou à d'autres fins, ou être utilisés à titre de chape.

La solution 4 utilise des pompes à chaleur standard ou spéciales pour une installation séparée sur le toit du bâtiment dans le but de réduire au minimum les émissions sonores à l'extérieur. Les charges par unité de surface admissibles de la toiture doivent être respectées. L'unité intérieure peut être installée dans le grenier ou au sous-sol du bâtiment en fonction de l'espace disponible.

La solution 5 repose sur l'installation à l'extérieur d'une ou de plusieurs pompes à chaleur standard installées sur le toit du bâtiment. Dans le contexte des aspects de patrimoine architectural et compte tenu des exigences strictes concernant les émissions sonores des pompes à chaleur, la mise en œuvre de cette solution par rapport aux solutions 3 et 4 est considérée comme nettement plus critique. Cette solution ne doit donc être envisagée que si la mise en œuvre selon les solutions 1 à 4 n'est pas possible. Comme pour la solution 3, cette solution impose des exigences strictes concernant la statique du bâtiment et peut rendre nécessaires des améliorations de la statique situationnelle.

La décision quant à la solution utilisée de la manière la plus avantageuse pour un bâtiment particulier dépend des conditions situationnelles du bâtiment et du fait que les solutions en question sont susceptibles d'être autorisées.

Étude de projets virtuels et recommandations

Les solutions développées ont été mises en œuvre et testées dans le cadre d'études de projets virtuels sur trois bâtiments appartenant à la ville. Les bâtiments pris en compte diffèrent en termes de puissance de chauffage requise, caractéristiques de construction des bâtiments, de zonage et d'exigences relatives au patrimoine architectural.

Les études de projets virtuels confirment que la mise en œuvre de systèmes de chauffage avec des pompes à chaleur air-eau en milieu urbain est techniquement possible dans de nombreux cas avec les technologies et les installations standard disponibles actuellement et qu'elles sont judicieuses du point de vue de l'énergie primaire. Les pompes à chaleur de tous les systèmes prévus peuvent fonctionner avec des facteurs de performance annuels acceptables compris entre 2,5 et 3,3 et contribuer ainsi à d'importantes économies d'énergie primaire et de gaz à effet de serre par rapport aux substituts de chauffage à énergie fossile au mazout ou au gaz. L'étude de projets virtuels montre également que les strictes exigences en matière d'émissions sonores des pompes à chaleur peuvent être systématiquement satisfaites avec une étude de projet correcte, mais nécessitent parfois des mesures spécifiques, par exemple des capots d'isolation acoustique, etc. Parallèlement, les études montrent qu'une rénovation du chauffage utilisant des pompes à chaleur air-eau peut entraîner des coûts d'investissement plus élevés qu'un remplacement de chauffage à énergie fossile au mazout ou au gaz. En fonction de la solution alternative utilisée, on peut s'attendre à une augmentation des coûts d'investissement de l'ordre de 2 à 5 par rapport à un remplacement de chauffage à énergie fossile au mazout ou au gaz. Ces résultats sont valables compte tenu des conditions générales applicables dans la ville de Zurich et des modèles de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC 2014).

Concernant les coûts d'investissement, d'exploitation et de production de chaleur qui en résultent, les études de projets virtuels montrent que les coûts des systèmes de pompes à chaleur air-eau sont notamment dus au choix des pompes à chaleur utilisées (installations standard ou spécifiques), au choix de la solution pour l'installation des pompes à chaleur et peuvent être influencés par le dimensionnement de la puissance de chauffage ou par la sélection du mode de fonctionnement de la pompe à chaleur (monovalent ou bivalent). En particulier, l'utilisation de pompes à chaleur spécifiques et/ou l'application d'une conception ou d'un mode de fonctionnement monovalent des pompes à chaleur peuvent influencer et augmenter considérablement les coûts d'investissement pour la mise en œuvre du système de chauffage avec des pompes à chaleur air-eau.

L'importance de l'utilisation cohérente des installations standard est particulièrement évidente en termes de coûts d'investissement. Les coûts particuliers des installations spécifiques sont plus élevés de l'ordre de 1,5 à 2 par rapport aux installations standard. Les études de projets virtuels montrent également que l'utilisation d'installations standard au lieu d'installations spécifiques peut également avoir un effet positif sur les coûts de planification. Des installations spécifiques sont mises au point et fabriquées en fonction des besoins et des spécifications en particulier, ce qui nécessite une planification et une communication intenses entre l'urbaniste et le fabricant. En revanche, les pompes à chaleur standard peuvent être sélectionnées dans le catalogue avec relativement peu d'effort, ce qui permet une planification plus simple et plus efficace. L'autre avantage de l'utilisation d'installations standard peut être la sécurité de fonctionnement éventuellement accrue des installations standard grâce aux processus de production standardisés.

Concernant la sélection optimale de la solution à mettre en œuvre pour l'installation des pompes à chaleur, les études de projets virtuels montrent que les pompes à chaleur devraient idéalement être installées à l'intérieur, au sous-sol du bâtiment. Et ce notamment lorsque les entrées et les sorties d'air nécessaires peuvent être facilement créées dans les parois extérieures. Les études de projets virtuels montrent également que l'installation extérieure classique des pompes à chaleur peut entraîner des coûts d'investissement relativement élevés en raison des éventuelles mesures de protection contre le bruit exigées à l'égard des pompes à chaleur (capots d'isolation acoustique, etc.). Dans ce cas, une installation intérieure des pompes à chaleur au sous-sol du bâtiment peut entraîner une baisse des coûts d'investissement en fonction des mesures requises du point de vue de la technique de construction. Si les pompes à chaleur doivent être installées dans le grenier ou sur le toit du bâtiment, cela peut engendrer des coûts d'investissement et de production de chaleur nettement plus élevés. Ces surcoûts sont notamment dus aux mesures statiques nécessaires dans de nombreux cas pour l'installation dans les combles ou sur le toit, qui doivent être planifiées et mises en œuvre en fonction du bâtiment considéré.

La conception et le mode de fonctionnement des pompes à chaleur ont également une influence significative sur les coûts d'investissement et de production de chaleur. En cas d'utilisation d'un mode de fonctionnement bivalent des pompes à chaleur en combinaison avec un autre générateur de chaleur, les coûts de production de chaleur peuvent être considérablement réduits sans que l'utilité écologique du système soit sérieusement affectée. Même avec un mode de fonctionnement bivalent des pompes à chaleur, les émissions de gaz à effet de serre peuvent être considérablement réduites par rapport à un mode de chauffage exclusivement à énergie fossile au fioul ou au gaz. Par exemple, avec une conception bivalente-parallèle des pompes à chaleur à 50 % de la puissance thermique maximale requise du bâtiment et en cas d'utilisation d'un produit électrique renouvelable pour le fonctionnement des pompes à chaleur, les émissions de gaz à effet de serre peuvent être réduites de 90 % environ.

Dans le cadre de la stratégie énergétique 2050 et du rejet de CO_2 à atteindre obligatoirement, les solutions bivalentes ne sont pas en principe recommandées. Dans ce contexte, les solutions avec des pompes à chaleur à fonctionnement monovalent doivent obligatoirement être privilégiées. En raison de l'amélioration sensible de la faisabilité (coûts, pose, sécurité de fonctionnement, etc.), les solutions avec une conception bivalente de la pompe à chaleur peuvent encore présenter un intérêt à court et à moyen terme, et faciliter voire permettre la future distribution des pompes à chaleur air-eau en milieu urbain. Une solution bivalente-parallèle avec des pompes à chaleur s'avère particulièrement intéressante si les pompes à chaleur sont conçues de manière à pouvoir prendre en charge une alimentation monovalente de chaleur thermique et d'eau chaude après une rénovation énergétique globale ultérieure du bâtiment.

Toutes les conclusions concernant la sélection optimale des pompes à chaleur (pompes à chaleur standard ou spécifiques), le choix optimal de la solution pour l'installation de la pompe à chaleur et la conception optimale ou le mode de fonctionnement des pompes à chaleur (monovalent ou bivalent) sont systématiquement prises en compte. Les systèmes de chauffage avec des pompes à chaleur air-eau sont pris en considération. Des pompes à chaleur air-eau peuvent être mises en œuvre qui, en fonction des bâtiments, peuvent garantir des coûts de production de chaleur de l'ordre de 16 à 21 centimes/kWh et ainsi apparaître justifiables d'un point de vue économique.

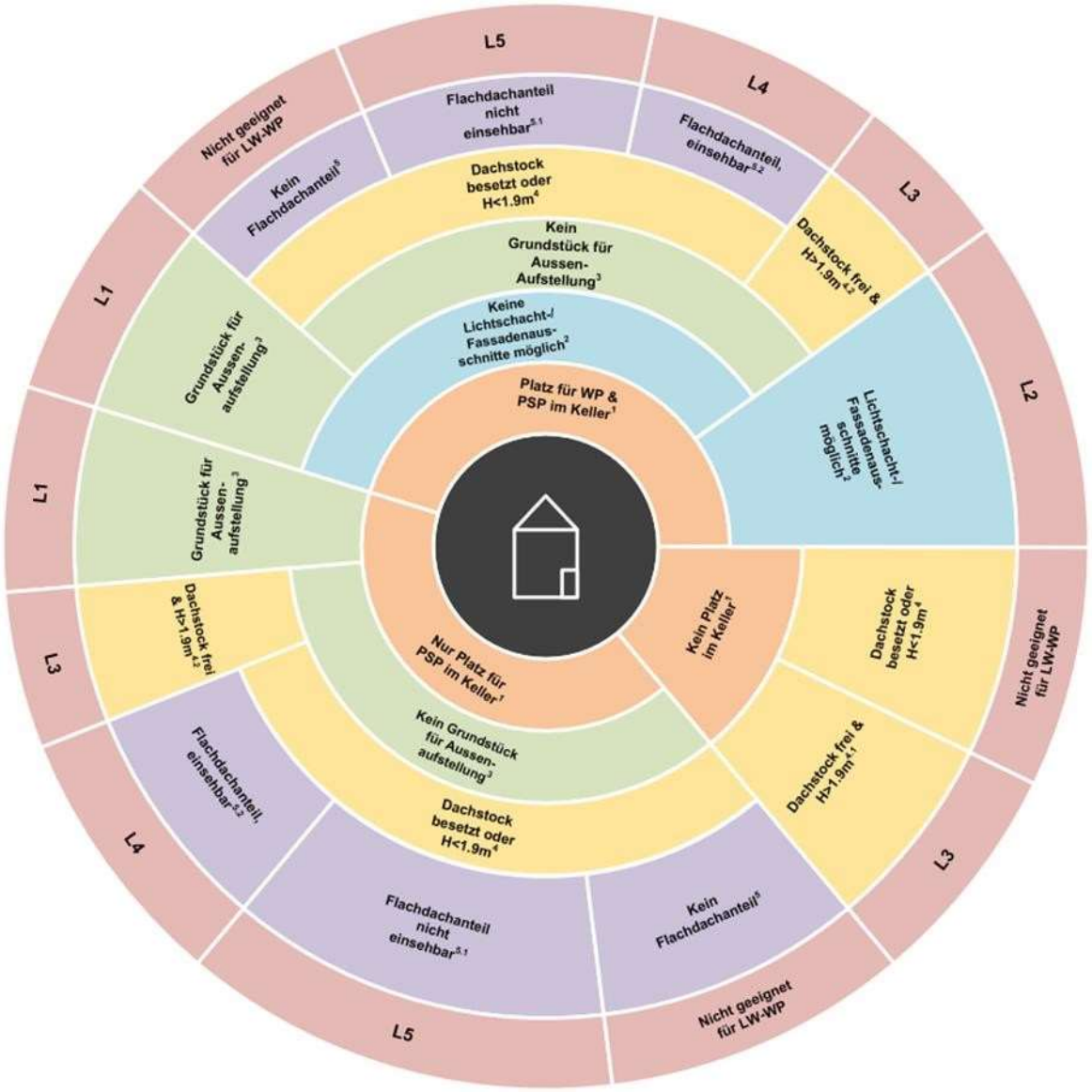
Dans la perspective d'une fourniture de chaleur renouvelable en milieu urbain dans le futur, l'utilisation du biogaz, là où aucun fioul n'est utilisé, pourrait représenter une alternative intéressante aux pompes à chaleur air-eau. L'utilisation du biogaz permet d'importantes économies de gaz à effet de serre à moindres coûts d'investissement pour la mise en œuvre du système. Cependant, les études de projets virtuels montrent que, compte tenu des coûts énergétiques actuellement très élevés du biogaz, il peut en résulter des coûts de production de chaleur plus élevés par rapport à l'utilisation de systèmes de pompe à chaleur air-eau bien dimensionnés et planifiés. Dans ce contexte, l'utilisation du biogaz n'est actuellement pas considérée comme suffisamment

adéquate à grande échelle. L'utilisation du biogaz peut cependant représenter une solution appropriée pour les zones dans lesquelles les pompes à chaleur air-eau sont interdites actuellement ou dans les endroits il n'y a généralement pas d'alternatives renouvelables au gaz ou au fioul.

Recommandations pour le processus de remplacement du chauffage par des pompes à chaleur air-eau en milieu urbain

Sur la base des conclusions des études de projets virtuels, une matrice des variantes détaillée pour vérifier l'aptitude d'un bâtiment donné à utiliser des pompes à chaleur air-eau comme principal générateur de chaleur a été élaborée dans le cadre de cette étude. La matrice des variantes contient les caractéristiques pertinentes du bâtiment et montre, sur la base de diverses interrogations, si le bâtiment se prête à la rénovation du chauffage à l'aide d'une pompe à chaleur air-eau. En outre, la matrice des variantes peut être utilisée pour déterminer quelle solution doit être utilisée de manière avantageuse concernant l'intégration de la pompe à chaleur air-eau dans le bâtiment. À l'aide des listes de questions préparées, les solutions correspondantes peuvent être examinées en profondeur et, partant de là, des informations supplémentaires concernant l'étude de projets, par exemple en déduire si l'utilisation d'installations standard est possible ou si une conception monovalente ou bivalente de la pompe à chaleur est judicieuse.

La matrice des variantes élaborée vise à offrir une assistance aux propriétaires et aux entreprises de planification à un stade précoce du projet préliminaire et ainsi à faciliter la planification des futurs systèmes de chauffage avec pompes à chaleur air-eau en milieu urbain.



Matrice des variantes (voir schéma 49, page 78)

Pratique en matière d'autorisations des pompes à chaleur air-eau en milieu urbain

Les obstacles actuels à la mise en œuvre de l'installation de pompes à chaleur air-eau dans les espaces extérieurs sont trop importants. Si la part de consommation d'énergie visée des pompes à chaleur à air extérieur de 12 % d'après le scénario d'efficacité du « Concept d'approvisionnement énergétique 2050 » doit être atteinte, la position officielle et la pratique en matière d'autorisations associée doivent être fondamentalement et complètement adaptées. À long terme, il convient de supposer que les pompes à chaleur air-eau sont l'unique solution possible pour utiliser des sources d'énergies renouvelables dans de nombreux endroits de la ville.

Les strictes exigences de conception et, en fonction de la zone, différentes rendent la mise en œuvre complexe et onéreuse ; cela concerne en particulier les zones centrales, et de préservation du centre et des quartiers. Il en résulte des exigences supplémentaires en cas de bâtiments classés et inventoriés. Les exigences de conception dans la zone centrale sont tellement strictes que l'installation extérieure est impossible dans la plupart des situations. Les strictes exigences en matière de protection contre le bruit, qui ont un impact négatif sur la conception et le financement, constituent un obstacle supplémentaire.

L'objectif doit être que l'autorisation d'une pompe à chaleur soit au moins aussi simple et brève que celle d'une installation de production de chaleur utilisant des combustibles fossiles. Les droits de voisinage des tiers doivent notamment être garantis.

Conclusion et action ultérieure

Concernant le concept d'approvisionnement énergétique 2050, il est indispensable de créer des solutions pour l'utilisation des pompes à chaleur air-eau en milieu urbain. Dans le cadre de cette étude, des solutions standard pour l'utilisation de pompes à chaleur air-eau dans les bâtiments des zones urbaines, dotés de puissances de chauffage comprises entre 10 et 60 kW, pourraient être élaborées et examinées à l'aide d'études de projets virtuels concernant les coûts de mise en œuvre et les aspects énergétiques.

Les études montrent que la mise en œuvre de systèmes de chauffage avec pompes à chaleur air en milieu urbain est déjà techniquement possible avec les technologies et les installations standard disponibles actuellement et qu'elle est judicieuse du point de vue de l'énergie primaire. Parallèlement, les études montrent qu'une rénovation de chauffage utilisant des pompes à chaleur air-eau doit être considérée avec des coûts supplémentaires considérables par rapport à un remplacement de chauffage au fioul ou au gaz. En particulier, l'utilisation de pompes à chaleur spécifiques et/ou l'application d'une conception et d'un mode de fonctionnement monovalent des pompes à chaleur peuvent influencer et augmenter les coûts d'investissement de manière décisive pour la mise en œuvre du système de chauffage avec des pompes à chaleur air-eau. Cependant, avec une planification et une mise en œuvre appropriées, des systèmes de chauffage avec pompes à chaleur air-eau sont envisageables, qui peuvent, en fonction du bâtiment, garantir des coûts de production de chaleur de l'ordre de 16 à 21 centimes/kWh et semblent donc justifiables d'un point de vue économique.

Pour favoriser la distribution souhaitée des pompes à chaleur air-eau en milieu urbain, il faut encourager non seulement les responsables de la planification et de la mise en œuvre, mais aussi les fabricants de pompes à chaleur. Pour que la mise en œuvre des pompes à chaleur air-eau soit simple et peu coûteuse dans les zones urbaines, des solutions standard et des pompes à chaleur standard optimisées sont nécessaires. Un critère important concernant les pompes à chaleur air-eau adaptées est, en plus des faibles émissions sonores, des dimensions réduites et du poids le plus bas possible afin de pouvoir monter facilement « en cascade » plusieurs pompes à chaleur. Le développement des pompes à chaleur air-eau doit aller dans le sens d'appareils plus petits, modulaires et silencieux afin de garantir son adéquation à la ville, sa pose et sa faisabilité.

La simplification, l'accélération et l'assouplissement partiel de la procédure d'autorisation de l'utilisation des pompes à chaleur air-eau sont également souhaitables. À titre d'exemple, en raison de la pratique actuelle en matière d'autorisation des pompes à chaleur, l'installation de systèmes standard sur le toit du bâtiment, conformément à la solution 5, n'est possible que dans une mesure limitée, en fonction du zonage du bâtiment. Les spécifications actuelles dans les zones centrales sont particulièrement cruciales s'il y a des exigences accrues en matière de conservation des monuments historiques. L'utilisation de pompes à chaleur air-eau dans les zones du centre n'est actuellement possible que pour les solutions 2 et 3 dans des conditions aux limites particulièrement favorables. La future distribution des pompes à chaleur air-eau nécessitera non seulement des perfectionnements techniques et urbanistiques, mais également des adaptations des procédures d'autorisation et de leur mise en application.

2 Point de départ et objectif

Chauffer des bâtiments consomme beaucoup d'énergie et offre un fort potentiel pour de futures économies d'énergie primaire. En Suisse aujourd'hui, les pompes à chaleur sont principalement utilisées pour chauffer les bâtiments, en particulier dans les nouvelles constructions. Entre 2008 et 2017, environ 194 000 pompes à chaleur pour le chauffage des bâtiments ont été vendues dans toute la Suisse. Les experts estiment que 400 000 pompes à chaleur environ seront en service d'ici 2020. Un grand nombre de solutions techniquement éprouvées pour l'utilisation de pompes à chaleur pour fournir de la chaleur thermique et de l'eau chaude, en particulier pour les bâtiments neufs du segment des maisons individuelles et des immeubles locatifs, de sorte que les pompes à chaleur sont utilisées ici en général. En revanche, les projets de rénovation dans les zones urbaines à forte densité de population posent des défis plus importants. En règle générale, il s'agit de bâtiments dont la puissance de chauffage requise est supérieure de l'ordre de 40 à 100 kW et certains bâtiments sont en partie visés par la conservation des monuments historiques.

Le scénario d'efficacité pour l'année 2050 du concept d'approvisionnement énergétique 2050 de la ville de Zurich [2] suppose une proportion de pompes à chaleur dans la fourniture des besoins de chaleur pour le chauffage des locaux et l'eau chaude de 49 % environ. Dans les zones où il n'existe pas d'alternative à la distribution de chaleur de réseau ou lorsque le raccordement aux réseaux d'énergie ne peut être envisagé pour des raisons économiques, les pompes à chaleur devraient être utilisées en remplacement des systèmes de chauffage aux combustibles fossiles. Jusqu'à présent, les pompes à chaleur eau saumure-eau, qui utilisent le sol comme source de chaleur à l'aide de sondes géothermiques, étaient la solution standard pour le chauffage durable en raison de leur rendement élevé et de leur fonctionnement silencieux, en particulier dans les zones urbaines. Cependant, leur utilisation accrue engendre des difficultés [3]. De plus, les sondes géothermiques ne sont pas autorisées dans certaines zones de la ville de Zurich.

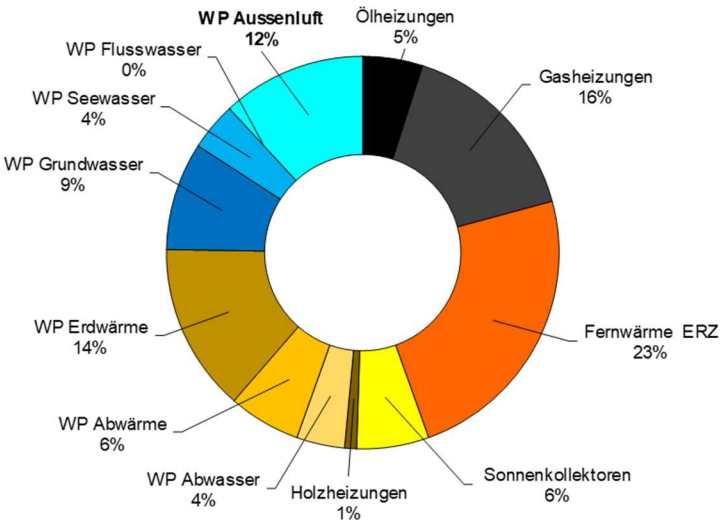


Schéma 1 : Scénario d'efficacité, répartition en pourcentage des systèmes utilisés dans la ville de Zurich en 2050 pour la fourniture de la chaleur thermique et de l'eau chaude. (Source : Rapport sur la planification de l'approvisionnement en énergie, ville de Zurich) [1])

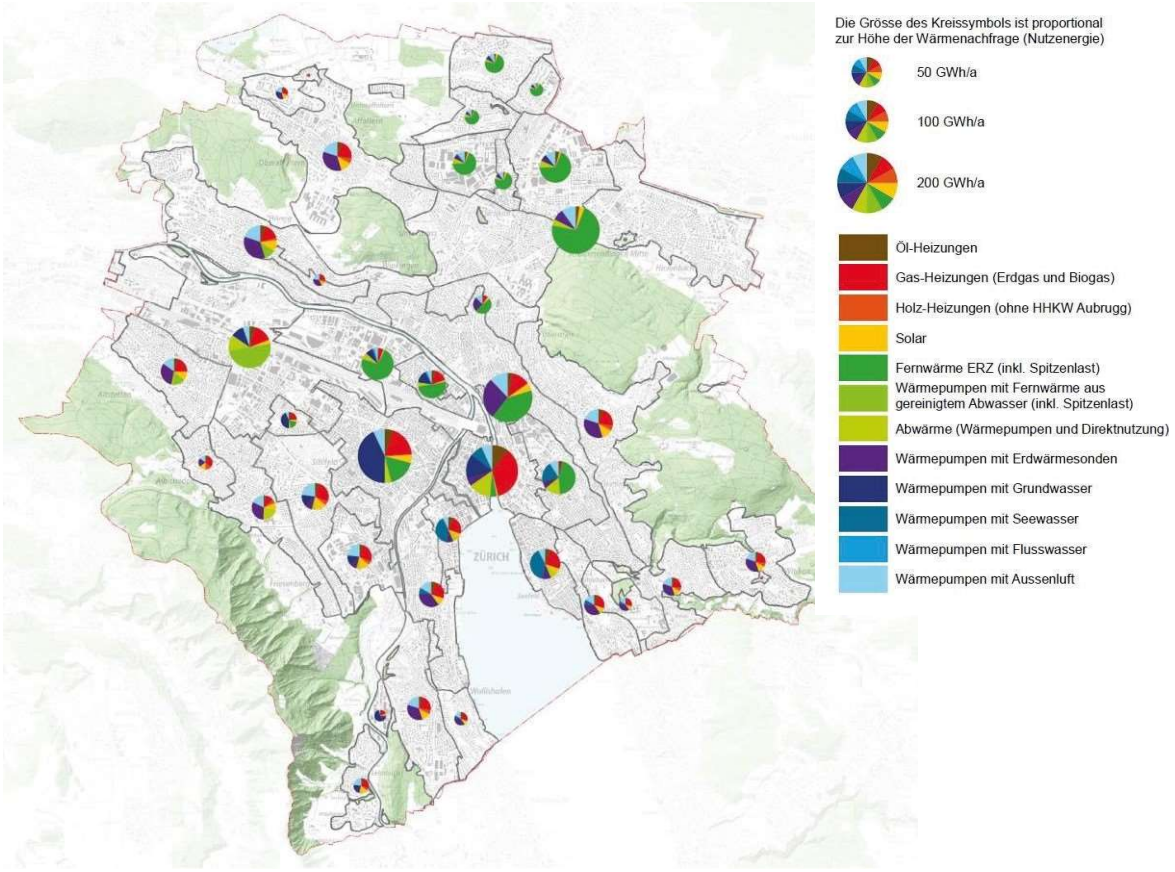


Schéma 2 : Scénario d'efficacité, système énergétique mixte, demande de chaleur/énergie utile de la ville de Zurich pour l'année 2050. (Source : étude « Concept d'approvisionnement énergétique 2050 » de la ville de Zurich [2])

L'utilisation de pompes à chaleur air-eau est un complément avantageux aux pompes à chaleur géothermiques. Dans ce contexte, la ville de Zurich assume une part de 12 % environ de la pompe à chaleur air-eau dans la fourniture des besoins de chaleur dans le scénario d'efficacité pour l'année 2050. La part actuelle ne représente qu'1 %.

Dans le domaine des pompes à chaleur air-eau, les fabricants proposent aujourd'hui des produits standard dotés d'une puissance thermique allant jusqu'à 35 kW environ, qui peuvent répondre à de strictes exigences en termes d'efficacité et d'émissions sonores. Toutefois, l'installation extérieure des pompes à chaleur air-eau est généralement difficile dans les zones à forte densité de population. D'une part, des exigences strictes en matière d'émissions sonores doivent être observées ; d'autre part, l'espace disponible dans les zones urbaines est souvent fortement limité. C'est pourquoi les pompes à chaleur air-eau extérieures classiques sont exclues dans de nombreuses zones. La possibilité d'atteindre l'objectif fixé pour 2050 dépend en grande partie de la possibilité d'utiliser ces systèmes dans des zones à forte densité de population dans des conditions spatiales difficiles si des solutions appropriées sont mises en œuvre.

L'objectif de ce projet est d'élaborer des solutions techniques applicables à grande échelle pour l'utilisation des pompes à chaleur air-eau dans des immeubles locatifs en milieu urbain (entre autres dans les bâtiments classés) avec des puissances de chauffage comprises entre 40 et 100 kW. L'objectif n'est pas de mettre au point de nouveaux produits, mais d'élaborer des solutions techniquement et économiquement réalisables basées sur la technologie disponible et le savoir-faire existant actuellement. Les objectifs fondamentaux sont la promotion de la distribution des pompes à chaleur air-eau en milieu urbain, la facilitation de leur utilisation et la démonstration du potentiel de ce marché en croissance.

Dans le cadre d'une recherche et d'une analyse de marché approfondies, des solutions adéquates et déjà appliquées concernant l'intégration des pompes à chaleur air-eau dans les zones urbaines ont été identifiées et compilées. Non seulement différents fabricants de systèmes de pompes à chaleur, mais aussi les autorités et les mairies ont été contactés et consultés. Toutes les solutions qui ont été déterminées et utilisées jusqu'à présent ont été compilées dans une matrice des variantes et évaluées à l'aide de critères d'évaluation appropriés (acoustique, efficacité, intégration dans le bâtiment). Les critères d'évaluation correspondants ont été élaborés au sein de l'équipe de projet composée d'ingénieurs, d'architectes et de responsables de la conservation des monuments historiques.

Dans un second temps, des bâtiments représentatifs du portefeuille de la ville de Zurich ont été sélectionnés en vue d'un examen approfondi et pour les études de projets types menées. Les biens immobiliers sélectionnés sont situés dans le périmètre de l'agglomération zurichoise, nécessitent des températures de départ élevées pour le chauffage des locaux et l'eau chaude et figurent en partie dans l'inventaire des bâtiments classés. Dans le but de créer des solutions standard applicables à grande échelle, des types de bâtiments ayant des combinaisons d'exigences aussi différentes que possible ont été sélectionnés de manière pompes à chaleur eau saumure-eau ciblée. Les bâtiments en question ont été sélectionnés en étroite collaboration avec l'Office des bâtiments (AHB) et le service des Biens-fonds de la ville de Zurich (LSZ).

Sur la base des conclusions de la recherche et de l'analyse de marché réalisées, des solutions adaptées pour l'intégration des pompes à chaleur air-eau dans les bâtiments urbains ont été élaborées dans le cadre d'études de projets préliminaires virtuels, et celles-ci ont été examinées en termes d'efficacité, de bruit et de coûts. Dans le cadre de l'élaboration de la solution, des concepts d'installation adaptés pour la pompe à chaleur et ses sous-systèmes et, partant de là, les dispositions des systèmes correspondants ont été mises au point pour les bâtiments sélectionnés. Lors de l'élaboration de la solution, un soin particulier a été apporté à l'utilisation de composants standard. Dans le cadre de l'élaboration de la solution, il a également été examiné dans quelles conditions un fonctionnement monovalent de la pompe à chaleur est possible et utile, et dans quelles conditions un fonctionnement bivalent des pompes à chaleur en combinaison avec des générateurs de chaleur supplémentaires est souhaité. Pendant toute l'élaboration de la solution, les valeurs d'efficacité réalisables avec le concept de solution correspondant ainsi que les coûts de mise en œuvre et d'exploitation attendus du système ont été constamment calculés afin de permettre la mise en œuvre de systèmes rentables sur le plan économique et écologique.

Sur la base des conclusions de l'étude de projets virtuels, une matrice de vérification détaillée a été élaborée pour vérifier l'adéquation d'un bâtiment donné à l'utilisation de pompes à chaleur air-eau comme principal générateur de chaleur. La matrice de vérification contient toutes les caractéristiques pertinentes du bâtiment et peut utiliser diverses questions pour démontrer si le bâtiment est adapté à la rénovation du chauffage à l'aide d'une pompe à chaleur air-eau et quelle solution peut être utilisée de manière avantageuse.

3 Bases

3.1 Méthodes de construction des pompes à chaleur

Cette étude examine des pompes à chaleur air-eau d'une puissance de 10 à 60 kW. Sont prises en compte les deux installations standard fabriquées en série et qui peuvent être sélectionnées dans le catalogue, ainsi que des installations spécifiques mises au point et fabriquées à la demande du client. Les pompes à chaleur air-eau actuelles sont disponibles dans différentes conceptions qui, selon le type d'installation et d'intégration, peuvent présenter divers avantages et inconvénients. Les méthodes de construction des pompes à chaleur air-eau considérées dans cette étude sont brièvement décrites ci-dessous.

3.1.1 Pompes à chaleur compactes pour une installation intérieure

Les pompes à chaleur compactes pour une installation intérieure se caractérisent par le fait que tous les composants de l'unité de pompe à chaleur sont situés dans un seul appareil ou boîtier. En présence de plusieurs pompes à chaleur compactes pour une installation intérieure, diverses unités supplémentaires, telles que des pompes, des vannes de commutation hydrauliques ou des vases d'expansion, sont également intégrées dans le boîtier, ce qui peut considérablement réduire le travail d'installation.

Avec les pompes à chaleur compactes pour une installation intérieure, l'air extérieur, qui sert de source de chaleur pour la pompe à chaleur, est conduit vers l'appareil et vers l'extérieur à l'aide de conduits de ventilation insonorisés et isolés thermiquement. Pour ce faire, des découpes de façade de grandes dimensions avec des grilles de protection contre les intempéries ou des puits de lumière sont également nécessaires. L'installation intérieure permet de réduire la visibilité au minimum. L'utilisation de pompes à chaleur compactes installées à l'intérieur génère des émissions sonores à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment. Le lieu d'émission à prendre en compte est l'emplacement du puits de lumière traversé par l'air ou de la grille de protection contre les intempéries. Si des conduits de ventilation suffisamment insonorisés sont utilisés, des valeurs de puissance acoustique très faibles peuvent être obtenues avec des pompes à chaleur compactes installées à l'intérieur, ce qui peut être un avantage considérable en termes d'éligibilité à l'autorisation.

Schéma 3 : Pompe à chaleur air-eau pour une installation intérieure en version compacte avec des conduits de ventilation (source : AIT Schweiz AG)

3.1.2 Pompes à chaleur compactes pour une installation extérieure

Comme pour les pompes à chaleur compactes installées à l'intérieur, tous les composants de l'unité de pompe à chaleur sont également situés dans un seul boîtier pour les pompes à chaleur compactes pour une installation extérieure. Les pompes à chaleur compactes installées à l'extérieur peuvent être installées contre la façade ou sur pieds en fonction des spécifications du fabricant. L'air ambiant est aspiré directement par la pompe à chaleur, refroidi puis soufflé à l'air libre. L'intégration hydraulique de pompes à chaleur compactes installées à l'extérieur s'effectue via des conduites d'eau chaude résistantes au gel et hautement isolées. En raison de leur conception, les pompes à chaleur compactes installées à l'extérieur ont souvent des niveaux de puissance acoustique plus élevés comparés à d'autres conceptions de pompe à chaleur. Le lieu d'émission à prendre en compte dans le certificat de protection contre le bruit est l'emplacement de l'installation de la pompe à chaleur.

Schéma 4 : Pompe à chaleur air-eau pour une installation extérieure en version compacte (source : IDM-Energiesysteme GmbH)

3.1.3 Pompes à chaleur split

Les pompes à chaleur air-eau en version split se composent d'une unité intérieure et d'une unité extérieure. Une distinction est faite selon deux principes de construction différents, les installations de séparation des réfrigérants et les installations de séparation hydraulique.

En cas d'installations avec séparation des réfrigérants, l'unité intérieure comprend généralement le compresseur, le condensateur et le dispositif de réglage, tandis que l'unité extérieure comprend l'évaporateur et le ventilateur. Les conduits de raccordement entre les unités intérieure et extérieure passent directement à travers le réfrigérant. Les distances maximales et les différences de hauteur entre les unités intérieure et extérieure ne doivent pas être dépassées à cause des conduits de raccordement transportant du réfrigérant entre les unités intérieure et extérieure. Cela peut considérablement limiter la flexibilité lors de l'installation de la pompe à chaleur.

En cas d'installations de séparation hydraulique, l'unité intérieure comprend tous les composants de l'unité de pompe à chaleur. En revanche, l'unité extérieure comprend un refroidisseur à air à ailettes et un ou plusieurs ventilateurs. Une solution aqueuse d'éthylène glycol passe à la fois à travers l'unité extérieure et les conduits de raccordement entre les unités intérieure et extérieure, comme moyen de transport de la chaleur et de protection contre le gel. Les transports de ce moyen sont effectués à l'aide d'une pompe supplémentaire. L'avantage des installations de séparation hydraulique est que la distance maximale et la différence de hauteur maximale entre les unités intérieure et extérieure sont quasiment illimitées.

L'unité extérieure des pompes à chaleur split peut être installée contre la façade ou sur pieds en fonction des spécifications du fabricant. Compte tenu de la structure avec des unités intérieures et extérieures, les pompes à chaleur split ont généralement un niveau de puissance acoustique plus faible que les pompes à chaleur compactes, ce qui peut améliorer l'éligibilité à l'autorisation. Le lieu d'émission à prendre en compte dans le certificat de protection contre le bruit est l'emplacement de l'installation de l'unité extérieure de la pompe à chaleur.

Schéma 5 : Pompe à chaleur air-eau en version split (source : Ochsner Wärmepumpen GmbH)

3.2 Modes de fonctionnement des pompes à chaleur - fonctionnement monovalent opposé à bivalent

La fourniture de chaleur pour le chauffage et le cas échéant pour l'eau chaude peut être réalisée par des pompes à chaleur seules ou en combinaison avec des installations de fourniture chaleur supplémentaires. Si la chaleur est fournie exclusivement par la pompe à chaleur, on parle de fonctionnement monovalent. La fourniture de chaleur par une pompe à chaleur en combinaison avec des technologies supplémentaires est appelée mode de fonctionnement bivalent. Le mode de fonctionnement idéalement utilisé pour un immeuble donné dépend de toute une série de facteurs. Il s'agit notamment des éléments suivants :

- Température de la source de chaleur
- Température du dissipateur thermique (température de départ du système de dissipation de chaleur)
- Temps de blocage de la consommation d'énergie électrique par les entreprises d'approvisionnement en électricité
- Puissances électriques maximales disponibles
- Espace disponible pour les installations
- Coûts d'installation et de maintenance
- Tarifs de l'énergie
- Demande d'énergie primaire

Les modes de fonctionnement suivants des pompes à chaleur sont généralement différenciés et utilisés indépendamment de ces exigences.

3.2.1 Mode de fonctionnement monovalent

En mode de fonctionnement monovalent, la pompe à chaleur est l'unique installation de fourniture de chaleur à couvrir l'ensemble des besoins en chaleur pour le chauffage et, le cas échéant, l'eau chaude. La puissance thermique de la pompe à chaleur doit donc être dimensionnée pour la demande de chaleur thermique maximale du bâtiment avec la température ambiante minimale ou avec la température de conception correspondante d'après le cahier technique SIA 2028 [4].

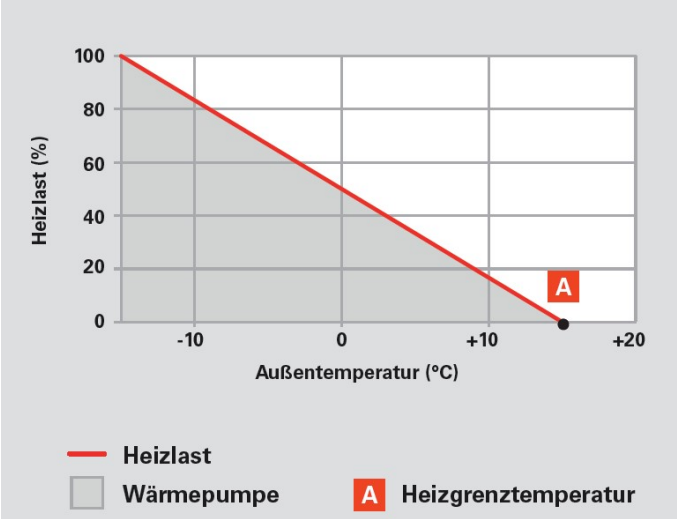


Schéma 6 : Mode de fonctionnement monovalent (source : Viessmann Deutschland GmbH)

Un fonctionnement monovalent des pompes à chaleur n'est possible que si la température maximale requise du système pour le chauffage et, le cas échéant, l'eau chaude ne dépasse pas les limites d'utilisation autorisées de la pompe à chaleur.

3.2.2 Mode de fonctionnement bivalent

En mode de fonctionnement bivalent, une technologie de fourniture de chaleur supplémentaire est utilisée en plus de la pompe à chaleur pour assurer une fourniture de chaleur suffisante pour le chauffage et, le cas échéant, l'eau chaude. Si l'installation de fourniture de chaleur supplémentaire est un chauffage d'appoint électrique, on parle de mode de fonctionnement monoénergétique. À ce stade, il convient de souligner que cette utilisation n'est plus autorisée pour le chauffage de l'eau d'après le modèle de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC) 2014 [5].

3.2.2.1 Mode de fonctionnement bivalent parallèle

En mode de fonctionnement bivalent parallèle, la pompe à chaleur couvre l'ensemble des besoins en chaleur pour le chauffage et, le cas échéant, l'eau chaude au-dessus d'une certaine température ambiante (température de bivalence). En dessous de cette température, une autre installation de fourniture de chaleur est activée. Indépendamment de cela, la pompe à chaleur est active sur toute la plage de températures ambiantes en mode de fonctionnement bivalent parallèle. La pompe à chaleur et le système de chauffage supplémentaire fonctionnent à des températures inférieures à la température d'équilibre. En cas d'utilisation du mode de fonctionnement bivalent-parallèle, la proportion d'énergie thermique provenant de l'installation de fourniture de chaleur supplémentaire, qui peut par exemple être conçue comme une chaudière au fioul ou au gaz, par exemple, peut être réduite au minimum.

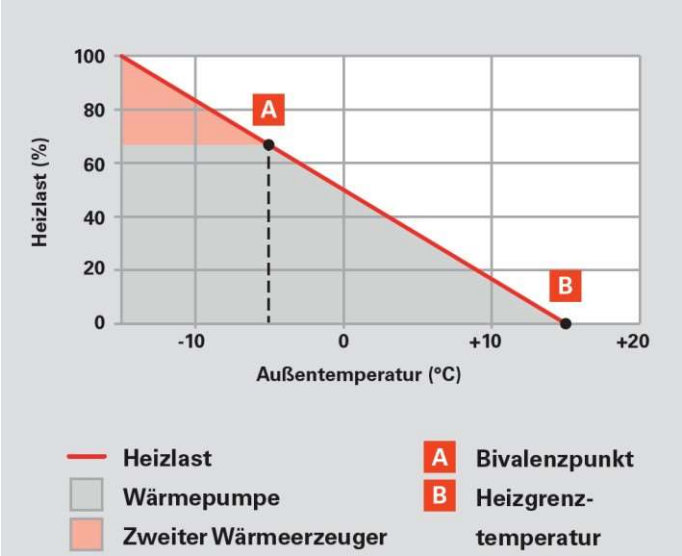


Schéma 7 : Mode de fonctionnement bivalent parallèle (source : Viessmann Deutschland GmbH)

3.2.2.2 Mode de fonctionnement bivalent alternatif

En mode de fonctionnement bivalent alternatif, la pompe à chaleur n'est active qu'à des températures ambiantes supérieures à la température de bivalence (voir schéma 8 Point de bivalence). La pompe à chaleur couvre l'intégralité des besoins en chaleur pour le chauffage et, le cas échéant, l'eau chaude à des températures ambiantes supérieures à la température d'équilibre. La pompe à chaleur est désactivée et le bâtiment est chauffé uniquement par le système de fourniture de chaleur supplémentaire à des températures ambiantes inférieures à la température de bivalence. Ce système doit être conçu de manière à pouvoir couvrir seul le besoin de puissance maximale du bâtiment pour le chauffage et, le cas échéant, l'eau chaude.

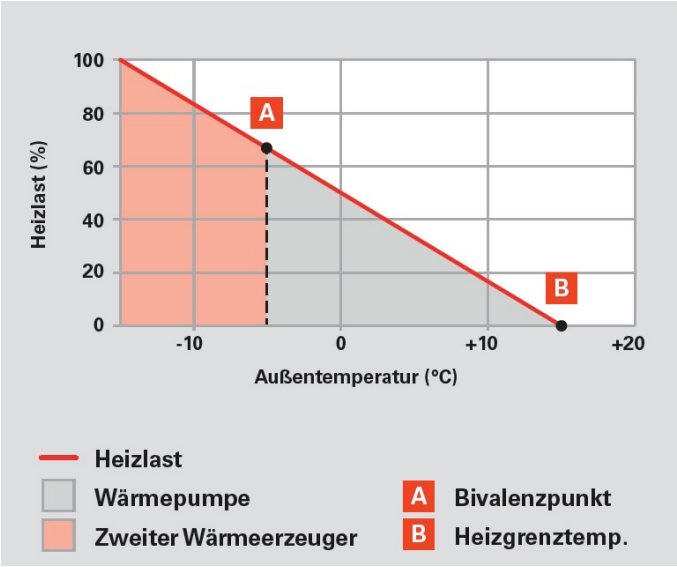


Schéma 8 : Mode de fonctionnement bivalent alternatif (source : Viessmann Deutschland GmbH)

La mise en œuvre d'un système de chauffage bivalent avec un mode de fonctionnement alternatif n'est en principe recommandée que si ce mode de fonctionnement conduit à un coefficient de performance annuel plus élevé comparé à l'utilisation d'un mode de fonctionnement bivalent parallèle. En cas des pompes à chaleur air-eau installées à l'extérieur, des mesures importantes doivent être prises pour assurer une protection adéquate contre le gel des pompes à chaleur dans le cas d'un mode de fonctionnement bivalent alternatif. La raison en est que dans ce mode de

fonctionnement, les pompes à chaleur restent désactivées à des températures ambiantes basses et donc l'eau de chauffage ne passe plus à travers.

3.2.2.3 Mode de fonctionnement bivalent partiellement parallèle

En mode de fonctionnement bivalent partiellement parallèle, la pompe à chaleur est l'unique installation de fourniture de chaleur à couvrir la totalité des besoins en chaleur pour le chauffage et, le cas échéant, l'eau chaude à des températures ambiantes supérieures à la température de bivalence. Si la température descend en dessous de la température d'équivalence, une installation de fourniture de chaleur supplémentaire est activée. Lorsque la température ambiante continue de baisser, la pompe à chaleur fonctionne en parallèle avec l'installation de fourniture de chaleur supplémentaire jusqu'à ce que la température de départ maximale ou les limites d'utilisation autorisées de la pompe à chaleur soient atteintes. Si la pompe à chaleur ne peut plus fonctionner en raison de l'exigence de températures de système plus élevées, elle est désactivée et l'installation de fourniture de chaleur supplémentaire couvre entièrement la puissance requise pour le chauffage et, le cas échéant, l'eau chaude. Ceci doit être pris en compte lors de la conception du système.

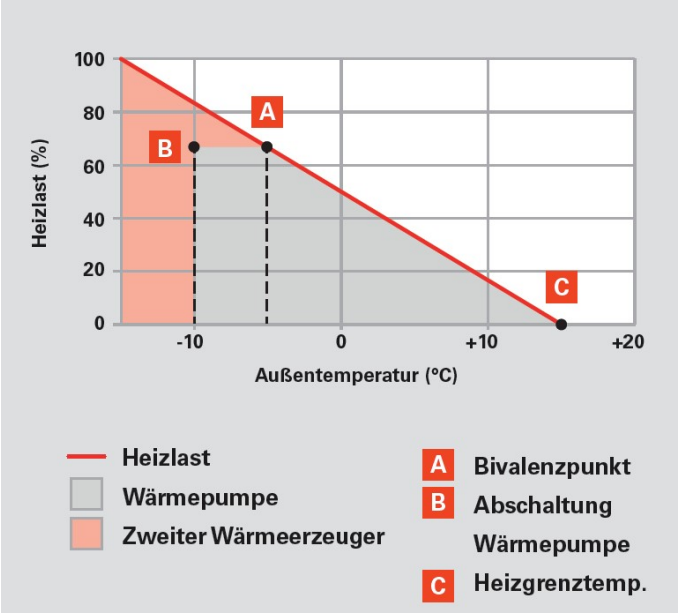


Schéma 9 : Mode de fonctionnement bivalent partiellement parallèle (source : Viessmann Deutschland GmbH)

La même exigence doit être observée avec le mode de fonctionnement bivalent alternatif : en particulier avec les pompes à chaleur air-eau installées à l'extérieur, des mesures importantes doivent être prises pour assurer une protection adéquate contre le gel, car la pompe à chaleur est à l'arrêt à des températures ambiantes basses. En outre, le générateur de chaleur supplémentaire doit être conçu pour être relativement grand pendant un minimum d'heures par an pour pouvoir fournir la puissance de chauffage nécessaire complète en dessous de la température de coupure B (voir schéma 9).

4 Analyse du marché

Dans le cadre d'une analyse de marché approfondie, des systèmes de pompe à chaleur air-eau standard pour fournir des puissances thermiques de 10 à 60 kW ont été évalués. En outre, plusieurs fabricants d'installations spécifiques, qui prennent en charge la conception et la fabrication d'installations frigorifiques et de pompes à chaleur pour le compte de clients, ont été interrogés sur leurs expériences en matière d'utilisation des pompes à chaleur air-eau en milieu urbain. Enfin, dans le cadre de l'étude de marché, les fabricants d'installations standard ont été interrogés sur leurs objectifs stratégiques concernant le perfectionnement futur des pompes à chaleur air-eau.

4.1 Produits standard

La recherche sur les produits standard ne prétend pas être exhaustive. Elle représente également une vision à l'instant T au moment de la réalisation de l'étude.

4.1.1 Installations standard - principales caractéristiques/données techniques

Dans le cadre de l'analyse de marché, différents concepts de pompes à chaleur air-eau d'aujourd'hui, disponibles en version standard, ont été pris en compte, quelle que soit la tâche à accomplir. Les concepts communs suivants de pompes à chaleur air-eau ont été pris en compte :

- Pompes à chaleur installées à l'intérieur
- Pompes à chaleur installées à l'extérieur en version monobloc
- Pompes à chaleur pour une installation séparée avec unités intérieure et extérieure

La recherche a non seulement pris en compte les pompes à chaleur, qui peuvent fournir la puissance de chauffage requise de 10 à 60 kW à une température ambiante de -7 °C lors de l'utilisation d'un seul appareil, mais également des appareils qui ne peuvent atteindre cette puissance que lorsque plusieurs appareils sont correctement mis en cascade. Cela s'explique notamment par le nombre très réduit de pompes à chaleur air-eau en mesure de fournir la puissance de chauffage nécessaire lors de l'utilisation d'un seul appareil.

La compilation en annexe 1 présente les données techniques des pompes à chaleur air-eau évaluées dans le cadre de l'étude de marché et disponibles en version standard pour fournir des puissances thermiques totales comprises entre 40 et 100 kW à une température ambiante de -7 °C.

L'étude de marché montre que très peu de pompes à chaleur air-eau se prêtent à une installation intérieure dans les bâtiments dans la gamme de puissance de chauffage de 10 à 60 kW considérée. Cela s'explique par le débit volumique d'air résultant de l'utilisation de l'air ambiant comme source de chaleur. Lorsque la pompe à chaleur est installée à l'intérieur, ces débits volumiques d'air nécessitent des découpes murales sur une grande surface et des conduits de ventilation de grande section transversale pour aspirer et souffler l'air. En cas de pompe à chaleur air-eau d'une puissance de chauffage de 60 kW et observant une vitesse d'écoulement maximale de 2,5 m/s, la section transversale requise des conduits de ventilation et des découpes murales est par exemple de 5 m² environ. Des sections transversales plus petites peuvent occasionner une émission de bruit inadmissible compte tenu de l'augmentation de la vitesse de l'air.

En raison des difficultés mentionnées dans le cadre de l'utilisation de pompes à chaleur air-eau installées à l'intérieur, les pompes à chaleur air-eau pour une installation extérieure sont pour l'essentiel disponibles dans la gamme de puissance considérée. L'inconvénient des pompes à chaleur air-eau en version compacte est le niveau de puissance acoustique légèrement plus élevé de son unité extérieure, l'inconvénient de la version split est notamment la distance maximale autorisée entre les unités intérieure et extérieure de la pompe à chaleur (distance horizontale et différence

de hauteur), qui peut être considérablement limitée en fonction du produit.

Il existe des différences majeures entre les produits standard disponibles, notamment concernant la possibilité de réglage des pompes à chaleur. Parmi les produits évalués, seuls trois fonctionnent avec un système de réglage pour l'adaptation continue de la puissance produite à la puissance de chauffage requise par le bâtiment. Alors que la technologie de réglage de puissance continu est déjà largement utilisée dans les pompes à chaleur air-eau d'aujourd'hui jusqu'à une puissance de chauffage de 15 kW environ, le réglage de puissance continu est rarement utilisé dans les pompes à chaleur pour accroître la puissance. Cependant, notamment avec des puissances de chauffage plus élevées, le potentiel d'augmentation de l'efficacité grâce à un réglage continu de la puissance serait important, ce que confirme étonnamment l'étude « Pompes à chaleur air-eau efficaces grâce à un réglage continu de la puissance » [6] commandée par l'Office fédéral de l'énergie. Les installations dotées d'une simple commande marche/arrêt d'un seul compresseur se sont avérées particulièrement désavantageuses. Une telle commande marche/arrêt conduit à une consommation électrique élevée à des températures extérieures plus élevées et nécessite l'utilisation de grands réservoirs d'accumulation pour garantir des temps de fonctionnement minimaux de la pompe à chaleur. Le nombre de pompes à chaleur évaluées, qui fonctionnent d'après le principe du simple réglage marche/arrêt avec un seul compresseur, est faible en raison des inconvénients majeurs de ce type de réglage. La plupart des installations standard disponibles fonctionnent également d'après principe du réglage marche/arrêt, mais utilisent deux compresseurs, ce qui permet de faire une commutation entre une puissance 100 et 50 %. Grâce à cette mesure simple, les inconvénients majeurs de la commande marche/arrêt peuvent être considérablement atténués sans avoir à utiliser des convertisseurs de fréquence coûteux dans les pompes à chaleur.

Les différences par rapport aux conditions d'utilisation autorisées des pompes à chaleur évaluées sont relativement faibles. Toutes les pompes à chaleur air-eau standard disponibles peuvent être utilisées à des températures de l'air minimales autorisées de -20 °C environ. Les températures de départ maximales réalisables des pompes à chaleur sont également comparables. Presque toutes les installations évaluées peuvent fournir des températures de départ maximales de l'ordre de 60 °C à une température ambiante de -7 °C.

En revanche, il existe des différences majeures entre les installations standard évaluées, notamment en termes de niveau de puissance acoustique et d'efficacité énergétique des systèmes. Alors que le niveau de puissance acoustique de l'unité extérieure de la pompe à chaleur la plus silencieuse est très faible, à savoir seulement 48 dB (A), l'unité ayant la puissance acoustique la plus médiocre avec un niveau de puissance acoustique de 80 dB (A) peut difficilement être utilisée dans les zones urbaines sans mesures supplémentaires. Les indices de performance (« coefficient de performance », valeurs COP) des appareils évalués varient aussi fortement. Alors que la pompe à chaleur la plus médiocre en termes d'efficacité au point de test standard A2/W35 (température de l'air à 2 °C, température de départ de l'eau de chauffage à 35 °C) affiche un COP de 3,4 seulement, l'installation la plus efficace atteint un COP de 4,3 au même point de fonctionnement. D'après l'étude « Pompes à chaleur air-eau adaptées à la ville » de la ville de Zurich [7], un niveau de puissance acoustique maximal de 50 dB (A) est recommandé pour les pompes à chaleur air-eau. Parallèlement, les pompes à chaleur air-eau doivent atteindre une valeur d'efficacité minimale ou un COP de 3,6 pour A2/W35, indépendamment de ces strictes exigences de protection contre le bruit, afin qu'elles puissent être considérées comme adaptées à la ville. La combinaison de ces strictes exigences ne peut être satisfaite que par une seule des installations standard évaluées.

S'agissant des coûts des installations, les études menées montrent que les produits standard sont nettement plus avantageux à l'achat que les installations spécifiques. Les coûts particuliers (coûts bruts) des pompes à chaleur air-eau standard actuelles sont de l'ordre de 1 000 à 1 500 CHF par kW de puissance calorifique. En revanche, les coûts particuliers (coûts bruts) des installations spécifiques dépassent 2 000 CHF par kW de puissance calorifique.

4.1.2 Installations standard - évaluation

Pour évaluer l'adéquation des produits standard déterminés en vue d'une utilisation dans les zones urbaines jouissant en partie d'une protection des monuments, une matrice d'évaluation avec différents critères d'évaluation et de pondérations a été mise au point. Les critères et les évaluations suivants ont été pris en compte lors de l'élaboration de la matrice d'évaluation pour évaluer les produits standard disponibles.

Critère	**Évaluation en fonction des points**	**Répartition des points**
Niveau de puissance acoustique pompes à chaleur à liason hydraulique	Médiocre ≤ 3 Moyen > 3 et <7 Bon ≥ 7	linéaire, 45 dB (A) -> 10 points, 78 dB (A) -> 0 point
Modularité de la puissance de chauffage, réglage de la puissance	Médiocre ≤ 3 Moyen > 3 et <7 Bon ≥ 7	marche/arrêt à un niveau -> 0 point, marche/arrêt à deux niveaux -> 5 points, marche/arrêt à quatre niveaux ou plus -> 7 points, réglage de la puissance -> 10 points
Dimensions de la pose	Médiocre ≤ 3 Moyen > 3 et <7 Bon ≥ 7	Hauteur < 1,6 m et largeur < 0,8 m -> 10 points, sinon 0 point
Utilisation de réfrigérants avec un potentiel de réchauffement de la planète < 150	Médiocre ≤ 3 Moyen > 3 et <7 Bon ≥ 7	Oui -> 10 points, Non -> 0 point
Poids	Médiocre ≤ 3 Moyen > 3 et <7 Bon ≥ 7	linéaire, poids 500 kg -> 10 points, poids 2 500 kg -> 0
Efficacité	Médiocre ≤ 3 Moyen > 3 et <7 Bon ≥ 7	linéaire, COP A2/W35 4,5 -> 10 points, COP A2/W35 3,2 -> 0 point

Le critère du « niveau de puissance acoustique » de la pompe à chaleur air-eau revêt de l'importance. Il est vrai que les émissions sonores des pompes à chaleur peuvent être réduites par des mesures intelligentes telles que les conduits de ventilation insonorisés, les éléments d'insonorisation ou les boîtiers peuvent être réduits. Cependant, cela nécessite non seulement une planification optimale de l'ensemble de l'installation, y compris des mesures de protection contre le bruit, mais aussi souvent des coûts d'investissement élevés. L'analyse de marché montre que les pompes à chaleur avec un niveau de puissance acoustique de seulement 48 dB (A) sont techniquement réalisables. Il en résulte une distribution linéaire des points entre 10 points à un niveau de puissance acoustique de 45 dB (A) et 0 point à un niveau de puissance acoustique de 78 dB

(A).

Le critère « modularité de la puissance de chauffage ou du réglage de la puissance » de la pompe à chaleur est aussi considéré comme extrêmement pertinent. Si la pompe à chaleur est dotée d'un seul compresseur et d'une simple commande marche/arrêt, il en résulte une puissance thermique très élevée et une consommation électrique élevée en conséquence lorsque la pompe à chaleur fonctionne à des températures ambiantes plus élevées. Par conséquent l'alimentation électrique du bâtiment est fortement sollicitée pendant le fonctionnement à des températures ambiantes plus élevées, et de grands réservoirs d'accumulation doivent également être fournis pour garantir les durées de fonctionnement minimales requises de la pompe à chaleur, car des temps de cycle courts de moins de 20 minutes entraînent une réduction drastique de la durée de vie de la pompe à chaleur. L'utilisation de grands réservoirs n'est guère possible dans la plupart des bâtiments des zones urbaines en raison de l'espace limité disponible. Il est également difficile de fournir aux lignes d'alimentation électrique des réserves suffisantes pour le fonctionnement de simples pompes à chaleur air-eau commande marche/arrêt à des températures ambiantes plus élevées. Dans ce contexte, les pompes à chaleur à commande marche/arrêt simple sont évaluées à 0 point. Avec un réglage marche/arrêt, l'utilisation de plusieurs compresseurs permet d'améliorer sensiblement la possibilité de réglage. Grâce à cette mesure, la pompe à chaleur peut fonctionner à deux niveaux de puissance différents, par exemple lors de l'utilisation de deux compresseurs. La taille requise du réservoir est réduite de moitié dans une installation à deux niveaux. Cette mesure simple peut également réduire considérablement la consommation électrique maximale de la pompe à chaleur. Les pompes à chaleur à deux niveaux de puissance sont évaluées à 5 points, tandis que les pompes à chaleur à quatre niveaux de puissance ou plus sont évaluées à 7 points. Idéalement, la puissance de la pompe à chaleur est réglée en continu. Ceci est possible grâce à l'utilisation de compresseurs à vitesse variable. À l'aide du réglage de la puissance, les valeurs d'efficacité peuvent être optimisées et les tailles de réservoir requises et la consommation électrique maximale de la pompe à chaleur peuvent être réduites au minimum. Les pompes à chaleur dotées d'un réglage continu de la puissance sont évaluées à 10 points.

La masse d'installation peut être importante pour la mise en œuvre de tout système de pompe à chaleur. C'est notamment le cas lorsque les pompes à chaleur doivent être installées au grenier du bâtiment. Les machines de gros gabarit et encombrantes peuvent compliquer considérablement la pose, voire la rendre impossible. Dans ce contexte, le critère « dimensions de la pose » est également jugé pertinent. Les pompes à chaleur d'une hauteur d'installation inférieure à 1,6 m (installation dans le grenier) et d'une largeur inférieure à 0,8 m (entrée par les portes) sont se voient attribuer 10 points. Les pompes à chaleur qui dépassent cette masse sont évaluées à 0 point.

S'agissant du critère de poids, les points sont répartis de façon linéaire entre 10 points pour un poids total de 500 kg et 0 point pour un poids total de 2 500 kg avec une puissance thermique de 60 kW à une température ambiante de -7 °C.

L'évaluation des réfrigérants est de 10 points en cas d'utilisation d'un réfrigérant avec une valeur du potentiel de réchauffement de la planète inférieure à 150. Si la pompe à chaleur n'utilise aucun réfrigérant de ce type, il est évalué à 0 point.

Un autre critère pertinent dans le contexte de l'étude de projets est l'efficacité. Les pompes à chaleur actuellement disponibles sur le marché ont généralement de bonnes valeurs d'efficacité. L'expérience montre également que les pertes d'efficacité les plus importantes dans la plupart des cas ne surviennent pas au niveau de la pompe à chaleur elle-même, mais souvent à la suite d'intégrations, de planifications et de réglages du système défavorables. Ce fait est également confirmé par une étude de terrain sur les pompes à chaleur air-eau à réglage de la puissance, commandée par l'Office fédéral de l'énergie [8]. Indépendamment de cela, une répartition linéaire des points entre 10 points avec un COP de 4,5 pour A2/W35 et 0 point avec un COP de 3,2 pour A2/W35 est indiquée concernant l'efficacité.

Le schéma suivant donne un aperçu des évaluations qui en découlent des pompes à chaleur air-eau standard évaluées. Les valeurs nominales sont valables pour une configuration système du système de la pompe à chaleur avec une puissance de chauffage de 60 kW à une température ambiante de (-7 °C).

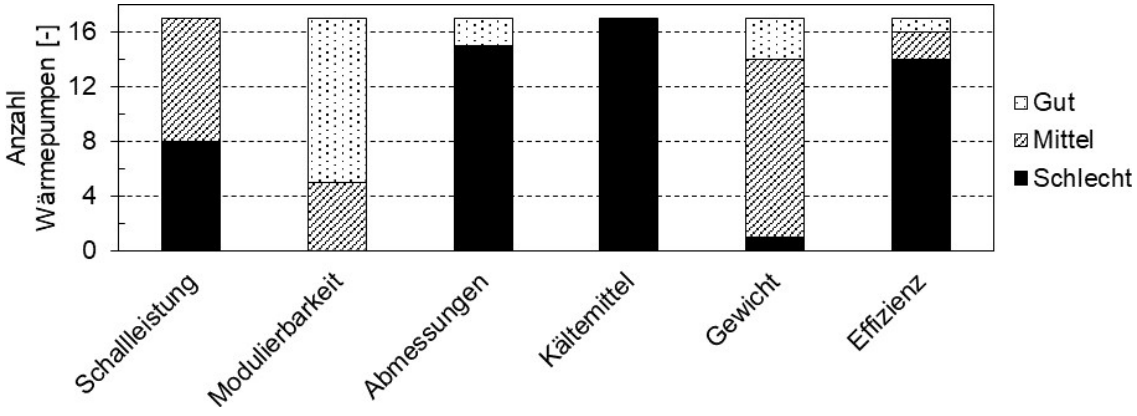


Schéma 10 : Évaluation des pompes à chaleur air-eau disponibles standard évaluées. Évaluation valable pour la configuration du système avec une puissance de chauffage de 60 kW à une température ambiante de -7 °C.

L'étude de marché montre qu'il n'y a pratiquement pas d'installations disponibles sur le marché pour fournir des puissances de chauffage plus élevées avec une grande efficacité et des niveaux de puissance acoustique suffisamment bas. Parmi les pompes à chaleur air-eau standard évaluées, une seule répond à la combinaison des exigences définies dans l'étude « Pompes à chaleur air-eau adaptées à la ville » [7] sur la base des critères d'efficacité et d'émissions sonores. Toutes les autres pompes à chaleur sont recalées notamment en raison des niveaux de puissance acoustique élevés. De plus, seuls quelques produits obtiennent une bonne note pour les critères « Dimensions rapportées à la performance » et « Poids rapporté à la performance ». Les dimensions et le poids de la pompe à chaleur air-eau peuvent compliquer considérablement sa pose dans les bâtiments existants, voire la rendre impossible. En l'occurrence, les produits modulaires, qui peuvent être décomposés en plusieurs ensembles, par exemple, présentent un avantage certain.

4.2 Installations spécifiques

Dans le cadre de l'étude de marché réalisée, divers fabricants suisses de pompes à chaleur ont été interrogés sur leurs expériences dans le domaine des systèmes spécifiques de pompes à chaleur air-eau en vue d'une utilisation dans les zones urbaines.

Le retour d'expérience recueilli montre que plusieurs fabricants proposent des installations standard jusqu'à une puissance de chauffage de 70 kW environ ainsi que des installations spécifiques dotées de puissances de chauffage jusqu'à 600 kW. Un défi majeur, qui s'aggrave avec l'augmentation de la puissance thermique de la pompe à chaleur, est le respect du faible niveau de puissance acoustique exigé des pompes à chaleur. En fonction de l'installation prévue des pompes à chaleur, des niveaux de puissance acoustique parfois inférieurs à 50 dB (A) peuvent être nécessaires. Dans ce contexte, les discussions montrent que la fabrication d'installations spécifiques avec de telles spécifications est techniquement possible, mais que la planification et la fabrication d'installations spécifiques correspondantes génèrent souvent des coûts élevés. L'espace requis pour les pompes à chaleur peut également être déterminant, car elles doivent être de grandes dimensions pour garantir un fonctionnement très silencieux.

Certains fabricants renoncent complètement aux systèmes de pompe à chaleur air-eau pour les puissances de chauffage de grand format et recommandent l'utilisation de systèmes saumure-eau ou eau-eau dans ce contexte.

4.3 Exemples d'installations standard et spécifiques

Les schémas suivants illustrent des exemples de produits standard actuellement disponibles sur le marché concernant les pompes à chaleur air-eau installées à l'intérieur et à l'extérieur. Les illustrations montrent également une sélection d'exemples d'installations spécifiques qui ont été conçues et fabriquées sur mesure pour une utilisation donnée.

Schéma 11 : Installation standard - pompe à chaleur air-eau Glen Dimplex installée à l'extérieur avec capot d'isolation acoustique intégré pour garantir un fonctionnement silencieux, Seon en Suisse (source : Kibernetik AG).

Schéma 12 : Installation standard - pompes à chaleur air-eau intérieures et extérieures Oertli, localité inconnue, pompes à chaleur à liaison hydraulique (source : Walter Meier AG).

Schéma 13 : Installation standard - pompes à chaleur air-eau extérieures en cascade d'Alpha Innotec de type LWA, en Allemagne (source : ait-deutschland GmbH).

Schéma 14 : Installation standard - unité extérieure de la pompe à chaleur split Alera 16XH Super Silence, Neuenkirch en Suisse (source : Alera energies AG).

Schéma 15 : Installation standard - unité extérieure de la pompe à chaleur split KNV Greenline LWSE-V24, en Autriche (source : Weichselbaumer GmbH).

Schéma 16 : Installation standard - pompes à chaleur air-eau extérieures en cascade de Templari de type KITA, en Italie (source : Templari S.r.l.).

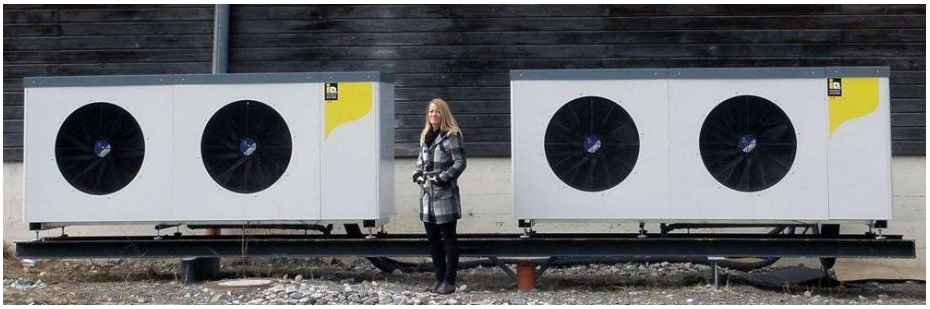


Schéma 17 : Installation standard - pompes à chaleur air-eau extérieures en cascade d'IDM de type Terra AL, en Autriche (source : Solar-Info-Zentrum GmbH).

Schéma 18 : Installation spécifique - transport d'un évaporateur de table de gros gabarit pour les pompes à chaleur de grande taille avec l'air ambiant comme source de chaleur, localité inconnue (source : CTA AG).

Schéma 19 : Installation spécifique - pompe à chaleur air-eau extérieure Unit One d'eta en version monobloc sur le toit d'un immeuble locatif, Affoltern am Albis en Suisse (source : eta Group GmbH).

4.4 Tendances de développement

Dans le cadre de l'étude de marché, les fabricants d'installations spécifiques et standard ont été interrogés sur leur expérience dans l'utilisation des pompes à chaleur air-eau dans les zones urbaines. Au cours de ces discussions, des questions ont entre autres été posées sur les tendances de développement stratégique dans le domaine des pompes à chaleur air-eau pour les utilisations de chauffage dans les bâtiments.

Lors de la fourniture de puissances de chauffage dans la tranche supérieure à35 kW, la tendance est à la mise en cascade des installations standard. La mise en cascade de plusieurs installations standard peut présenter des avantages non seulement en termes d'émissions sonores, mais aussi en termes de coûts de mise en œuvre.

D'autres tendances de développement sont observées en termes pompes à chaleur saumure-eau de facilité de montage et de maintenance des pompes à chaleur air-eau. L'objectif est de simplifier de plus en plus la transportabilité et donc la pose des pompes à chaleur grâce à une construction modulaire et ainsi les concevoir de manière plus sécurisée. La construction modulaire permettra de démonter les appareils en plusieurs assemblages et de les transporter séparément sans recourir à de grands moyens.

Divers fabricants accordent une grande importance à la future distribution des pompes à chaleur air-eau dans les zones urbaines. Certains fabricants ont considéré la rénovation des bâtiments urbains comme un futur segment de marché. Dans ce contexte, cependant, aucune pompe à chaleur ne devrait être mise au point explicitement pour cette utilisation, mais il conviendrait plutôt d'essayer de créer des produits standard qui seraient appropriés à cette utilisation et à l'utilisation classique.

En raison de la confidentialité des tendances de développement interne, tous les fabricants interrogés n'ont pas pu répondre aux questions posées.

5 Recherches complémentaires

Dans le cadre d'une recherche approfondie, les bureaux d'études, les instituts, les autorités et les administrations ont été interrogés sur leurs expériences en matière de planification et de mise en œuvre de systèmes de pompe à chaleur air-eau dans les zones urbaines où les bâtiments jouissent en partie d'une protection des monuments.

5.1 Bureaux d'études

Certains des bureaux d'études interrogés ont pu utiliser systématiquement des installations standard dans leurs projets, principalement des pompes à chaleur air-eau en version split. Cependant, les projets correspondants n'ont pas imposé d'exigences plus strictes en matière de conservation des monuments des bâtiments. Le respect des exigences en matière de protection contre le bruit n'était pas non plus crucial dans les projets correspondants en raison des distances relativement importantes par rapport aux récepteurs sensibles au bruit, ce qui facilite également l'utilisation d'installations standard.

D'autres urbanistes qui ont mis en place l'utilisation de systèmes de pompe à chaleur air-eau dans des bâtiments classés n'ont pu le faire qu'en installant les pompes à chaleur à l'intérieur pour des raisons esthétiques. Afin de pouvoir utiliser des installations standard, on s'est efforcé de réduire autant que possible la puissance de chauffage requise. Dans ce contexte, à titre d'exemple, les bâtiments n'étaient que partiellement chauffés par les pompes à chaleur (par exemple, uniquement les combles) ou les pompes à chaleur fonctionnaient en mode bivalent en combinaison avec un générateur de chaleur supplémentaire.

D'autres urbanistes ont indiqué qu'une installation intérieure de pompes à chaleur au grenier du bâtiment en cas d'utilisation d'un mode de fonctionnement monovalent et lorsque tout le bâtiment est chauffé par la pompe à chaleur ne peut être réalisée qu'à l'aide de pompes à chaleur compactes spécifiques. D'après l'entreprise de planification concernée, les points suivants doivent être pris en compte (voir le schéma 20 à ce propos) :

- Ouvertures relativement grandes dans la surface de toiture pour l'entrée et la sortie d'air (respect d'une vitesse de l'air maximale de 2,5 m/s)
- Garniture des conduits de ventilation avec un isolant acoustique
- Installation de la pompe à chaleur sur des éléments d'atténuation pour assurer un découplage parfait des bruits de structure
- Pompe à chaleur avec boîtiers insonorisants (réduction au minimum de la propagation du bruit transmis par l'air)

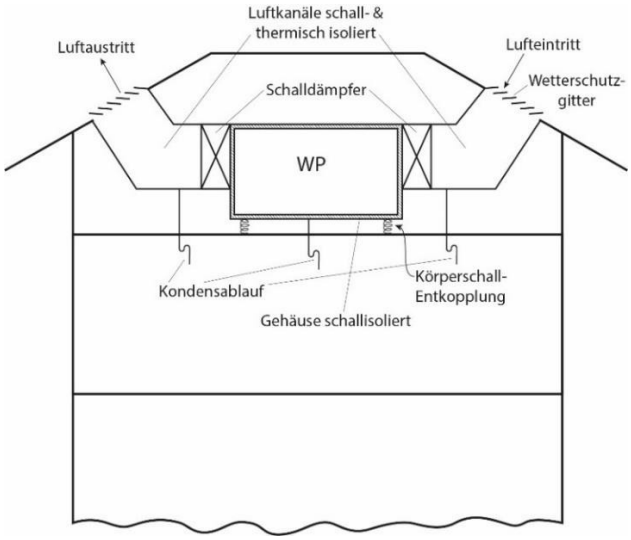


Schéma 20 : Concept d'installation de pompe à chaleur air-eau pour les bâtiments anciens classés en milieu urbain.

5.2 Institutions, autorités et administrations

Dans le cadre du projet de recherche de l'annexe 50 « Pompes à chaleur dans les immeubles locatifs pour le chauffage des locaux et l'eau chaude », l'Institut Fraunhofer pour les systèmes énergétiques solaires (ISE) travaille actuellement sur la pose et l'installation de pompes à chaleur air-eau dans les immeubles locatifs. Le projet a démarré début 2017 et des études théoriques sont actuellement en cours avec des pays partenaires (dont la Suisse, Office fédéral de l'énergie). Les premiers résultats y afférents sont attendus prochainement (dès mai 2019).

La Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse a réalisé l'étude « Intégration des pompes à chaleur air-eau en milieu urbain » pour le compte du canton de Bâle-Ville et de la ville de Zurich [9]. Le rapport « Comparaison des villes : pratique actuelle en matière d'autorisation des pompes à chaleur air-eau et possibilités d'optimisation pour le canton de Bâle-Ville » [10] a également été établi pour le compte du canton de Bâle-Ville. Toutefois, les deux études présentent un intérêt limité concernant l'utilisation des pompes à chaleur air-eau dans les grands immeubles locatifs.

Dans le cadre du programme éco21, SIG (Services Industriels de Genève) souhaite promouvoir la mise en œuvre de solutions renouvelables pour la production de chaleur dans les bâtiments existants, aussi bien pour les maisons individuelles que pour les grands immeubles d'habitation dotés de plusieurs appartements. Les propriétaires reçoivent des conseils et une aide financière. Hormis les nombreuses contraintes techniques, les conditions actuelles n'incitent pas les propriétaires à investir dans la production de chaleur renouvelable. Les solutions qui reposent sur les énergies renouvelables sont jusqu'à cinq fois plus onéreuses à installer que les systèmes traditionnels utilisant de l'énergie fossile. Dans ces conditions, les propriétaires remplacent souvent les anciennes installations par de nouvelles chaudières pour combustibles fossiles. Pour contrer ce problème, SIG-éco21 a mis en place un processus d'accompagnement dans le cadre du programme de chauffage renouvelable. SIG-éco21 prend en charge tous les coûts de la nouvelle installation et facture directement la distribution de chaleur aux locataires. Le propriétaire ne règle que le montant qui aurait été exigible au titre du remplacement par des combustibles fossiles.

SIG-éco21 a mis en œuvre plusieurs projets pilotes avec des pompes à chaleur air-eau dans des bâtiments à Genève. Les premiers résultats sont très encourageants. Ces systèmes doivent être utilisés à Genève et dans le reste de la Suisse pour accélérer la transition énergétique. En coopération avec l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), SIG-éco21 souhaite intensifier ce travail et mettre en œuvre d'autres projets. Dans ce contexte, le guide pratique « Pompes à chaleur sur toiture » [11] pour la mise en œuvre des pompes à chaleur air-eau pour les immeubles d'habitation en milieu urbain a été élaboré avec l'OFEN et la société CSD Ingenieure AG.

6 Solutions existantes

6.1 Projets pilotes

Les projets pilotes suivants concernant l'utilisation de pompes à chaleur air-eau dans les zones urbaines classées pourraient être identifiés dans le cadre des recherches menées.

6.1.1 Chauffage et refroidissement des logements dans les combles des anciens bâtiments viennois à l'aide de pompes à chaleur air-eau

« L'immeuble construit au milieu du 19e siècle, qui au cours de son histoire avait logé le compositeur de valse et d'opérette Johann Strauss Sohn, est un bâtiment classé. La vue sur la rue de l'immeuble devait impérativement être conservée pendant les travaux de construction. Néanmoins, le maître d'ouvrage visait à ce que les nouveaux appartements du dernier étage satisfassent à la norme d'une maison à faible consommation d'énergie et à une technologie de chauffage et de refroidissement avec des énergies renouvelables. Une pompe à chaleur pourrait être installée à proximité des nouveaux appartements du dernier étage avec des chemins de câbles courts et leur assurer une alimentation autonome. Elle peut être utilisée pour le chauffage et la production d'eau chaude ainsi que pour le refroidissement des pièces. Et dans les calculs comparatifs de rentabilité, la pompe à chaleur s'est particulièrement bien distinguée à un horizon temporel de 20 ans.

Schéma 21 : Remplacement du chauffage par une pompe à chaleur air-eau standard installée à l'extérieur en version monobloc dans un immeuble ancien classé à Vienne. (Source : IDM Energiesysteme GmbH)

Autre raison importante du choix du Terra AL 60 Max d'IDM : la protection contre le bruit doit être respectée lors de l'installation sur le toit. Les deux évaporateurs séparés ont chacun leur propre ventilateur, particulièrement silencieux. En conséquence, trois modes de fonctionnement avec commutations de 0 %, 50 % et 100 % peuvent être obtenus avec une seule machine. Le niveau du bruit peut être encore diminué en réduisant la vitesse du compresseur la nuit et/ou éventuellement en baissant la vitesse du ventilateur en mode nuit. Il était entouré de barrières antibruit spécifiques en tôle d'acier inoxydable spéciale à titre de mesure supplémentaire de protection contre le bruit. Ils sont conçus de manière à maintenir efficacement les émissions sonores à l'écart des appartements environnants et à ne pas obstruer l'alimentation en air des ventilateurs.

Le fabricant de pompes à chaleur IDM Energiesysteme a présenté un exemple de calcul avec une comparaison de différentes sources de chauffage pour l'aménagement du toit de l'immeuble situé dans la rue Praterstrasse 54 à Vienne. Sur la base des valeurs annuelles moyennes des conditions météorologiques à Vienne et du comportement moyen des futurs résidents en matière de chauffage et d'eau chaude, des coûts énergétiques annuels totaux de 4 300 € ont été calculés pour la pompe à chaleur IDM Terra AL 60 Max. Sur ce montant, environ 3 850 € sont attribués au chauffage et environ 450 € à la production d'eau chaude et à la pompe d'alimentation du chauffage. [12]

La pompe à chaleur conçue comme une installation monobloc extérieure a une puissance de chauffage nominale de 30 kW environ à une température ambiante de -7 °C et assure la fourniture monovalente de chauffage et d'eau chaude pour les combles du bâtiment. D'après la société IDM Energiesysteme GmbH, le chauffage de l'ensemble du bâtiment à l'aide d'une pompe à chaleur air-eau n'aurait pas été économiquement viable.

Des ventilo-convecteurs à convection forcée ont été utilisés pour dissiper la chaleur dans les pièces afin que les températures de départ nécessaires au chauffage des combles puissent être ramenées à moins de 60 °C. La production des pompes à chaleur est réalisée à l'aide d'une station d'eau douce, qui permet également de réduire les températures de départ maximales requises.

6.1.2 Projet pilote de la ville de Genève - pompes à chaleur extérieures standard

Dans le cadre du programme éco21, un système de chauffage monovalent et bivalent avec pompes à chaleur air-eau a été mis en place. Ce dernier est illustré ci-dessous.

Schéma 22 : Installation des pompes à chaleur air-eau extérieures en version compacte sur le toit du bâtiment (source : CSD Ingenieure AG).

Le système de pompe à chaleur air-eau utilisé est basé sur six pompes à chaleur air-eau extérieures en cascade en version compacte. Ce sont des installations standard d'Alpha Innotec de type LWA. Les pompes à chaleur sont installées sur le toit du bâtiment et, en combinaison avec une chaudière à gaz, assurent un chauffage bivalent-parallèle pour l'ensemble du bâtiment. Afin d'obtenir un découplage optimal des bruits de structure, les pompes à chaleur ont été placées sur des socles amortisseurs de vibrations massifs. La pose des pompes à chaleur a été réalisée à l'aide d'une grue. Le schéma 22 montre les pompes à chaleur air-eau installées à l'extérieur sur le toit du bâtiment.

Pour réaliser une installation simple et économique, les conduites d'aller et de retour des pompes à chaleur ont été posées à l'extérieur du bâtiment sur la façade. Cette variante de câblage pour les conduites d'aller et de retour des pompes à chaleur (entre le réservoir et les pompes à chaleur) peut être mise en œuvre de manière rentable et à peu de frais, mais il est peu probable qu'elle soit réalisable pour les bâtiments figurant dans la liste des bâtiments classés. Le schéma suivant montre les conduites d'aller et de retour des pompes à chaleur montées en façade.

Schéma 23 : Tuyaux calorifugés avec des conduites d'aller et de retour des pompes à chaleur qui s'étendent devant la façade (source : SIG-eco21).

6.1.3 Résidence médicalisée LAK à Mauren - pompe à chaleur spécifique installée sous le toit

La solution choisie par Güntner et CTA pour l'intégration des aéroréfrigérants dans les systèmes de climatisation sous le toit du bâtiment (cf. chapitres 6.1.5 et 6.1.6) a déjà également été couronnée de succès pour l'utilisation de pompes à chaleur air-eau. Un système de pompe à chaleur air-eau correspondant est situé dans la résidence médicalisée LAK à Mauren, Liechtenstein.

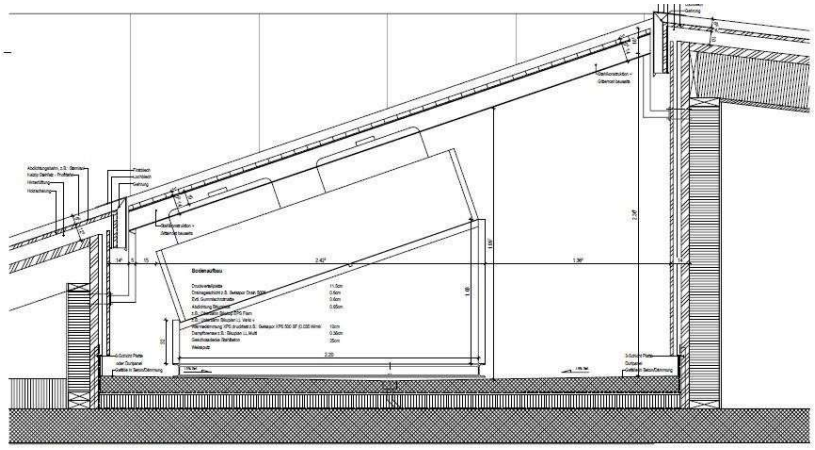


Schéma 24 : Coupe transversale de l'installation de l'aérofrigérant de table sous le toit d'une pompe à chaleur air-eau spécifique en version split dans la résidence médicalisée LAK à Mauren, Liechtenstein. (Source : Scheco AG)

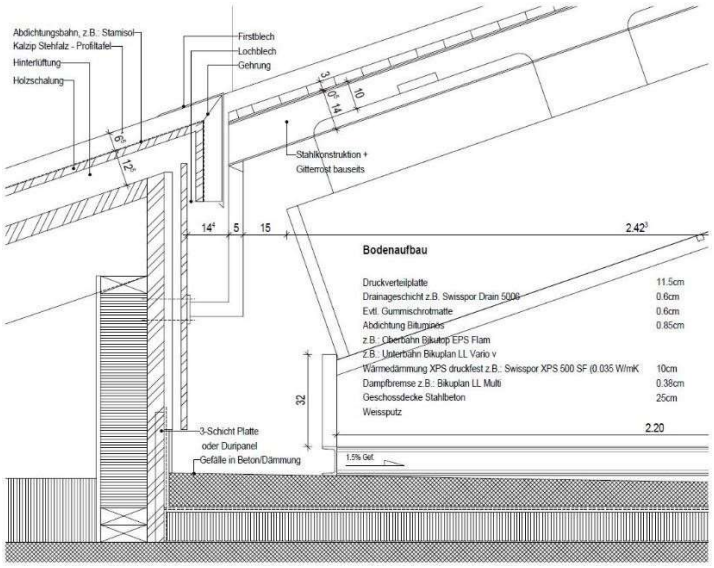


Schéma 25 : Vue détaillée de la coupe transversale de l'aéroréfrigérant de table sous le toit d'une pompe à chaleur air-eau spécifique en version split dans la résidence médicalisée LAK à Mauren, Liechtenstein. (Source : Scheco AG)

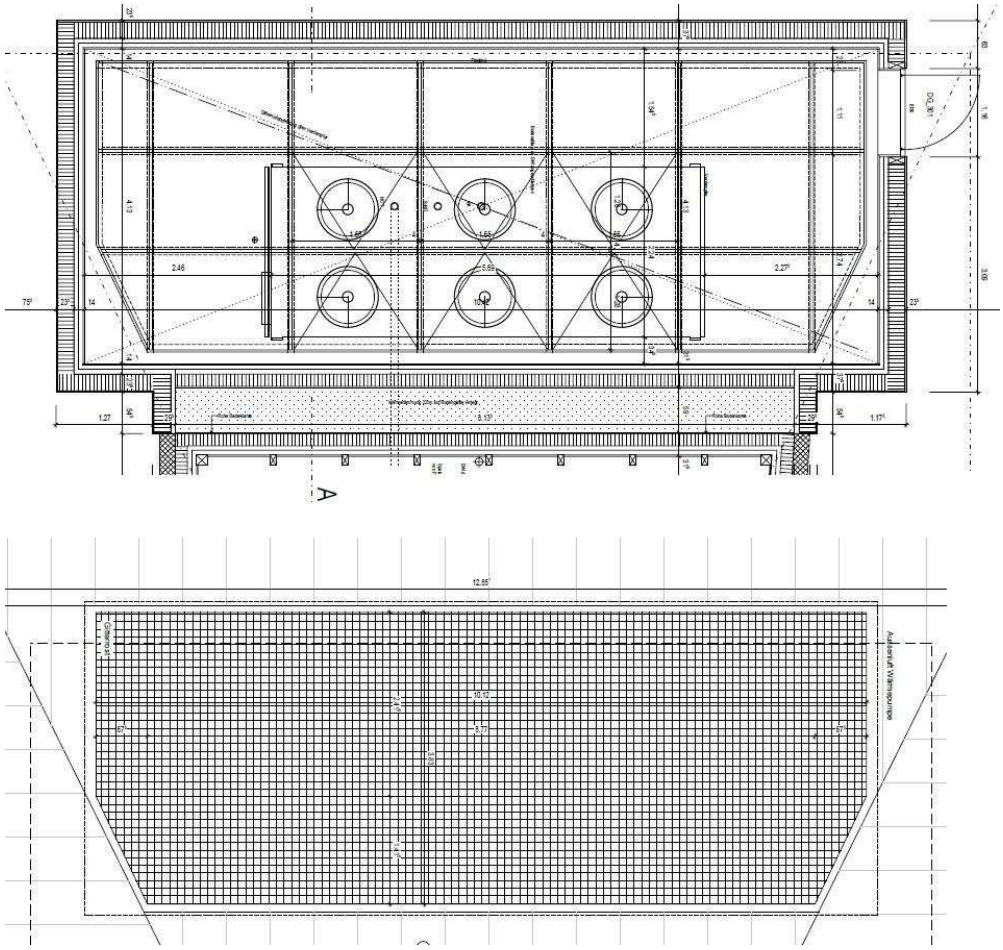


Schéma 26 : Esquisse de l'installation de l'aérofrigérant de table sous le toit d'une pompe à chaleur air-eau spécifique en version split dans la résidence médicalisée LAK à Mauren, Liechtenstein. (Source : Scheco AG)

Le système de pompe à chaleur air-eau utilisé dans la résidence médicalisée LAK à Mauren est basé sur une pompe à chaleur air-eau en version split. C'est une installation spécifique qui a été mise au point et fabriquée par Scheco AG. L'unité extérieure de la pompe à chaleur split a été conçue sous la forme d'un aéroréfrigérant de table et installée au grenier, sous le toit du bâtiment. Le toit était pourvu d'une grande ouverture pour aspirer et souffler l'air ambiant, qui était recouverte d'une grille de protection. Avec ce type de construction, l'ensemble du grenier, dans lequel est installée l'unité extérieure de la pompe à chaleur, doit par conséquent être rendu étanche et calorifugé. La pose de l'unité extérieure peut être effectuée via la grande ouverture du toit à l'aide d'une grue. Les schémas 25 et 26 montrent la structure du site d'installation de l'aéroréfrigérant de table sous le toit du bâtiment.

La solution utilisée permet non seulement d'installer la pompe à chaleur de manière invisible de l'extérieur, mais aussi de faire fonctionner la pompe à chaleur de manière extrêmement silencieuse si l'aéroréfrigérant de table utilisé est correctement dimensionné.

6.1.4 École Geschwister Scholl - Pompes à chaleur standard installées sous le toit

Dans le cadre de la rénovation de l'école Geschwister Scholl, l'installation de production de chaleur a été entièrement rénovée. Deux pompes à chaleur air-eau d'une puissance de chauffage totale de 44 kW environ à une température ambiante de -8 °C ont été utilisées comme générateurs de charge de base pour fournir de la chaleur. Les pompes à chaleur air-eau utilisées sont des systèmes standard pour une installation intérieure. Une chaudière à gaz est également utilisée pour un fonctionnement à charge maximale à basses températures ambiantes. Le système fonctionne en bivalent parallèle.

Les pompes à chaleur de type Glen Dimplex LI28TE ont été installées au grenier du bâtiment et l'air ambiant nécessaire au fonctionnement des pompes à chaleur air-eau est fourni au moyen de conduits de ventilation isolés thermiquement et acoustiquement. Les conduits de ventilation sont conçus séparément pour chaque pompe à chaleur afin d'éviter avec efficacité les courts-circuits dans le courant atmosphérique entre les différentes installations. Les ouvertures d'aspiration et d'échappement à l'extérieur du toit ont été conçues de sorte que même les fortes chutes de neige ne puissent pas causer de problèmes de fonctionnement. La conception retenue des ouvertures d'aspiration et d'échappement se rapproche de l'aspect des cheminées traditionnelles, et le bon choix de couleur et de matériau peut conduire à une intégration parfaite de la technologie dans le paysage de la toiture.

Schéma 27 : École Geschwister Scholl, pompes à chaleur standard installées au grenier et puits de sortie d'air sur le toit pour l'aération (source : Glen Dimplex Deutschland GmbH)

6.1.5 Altmarkt-Galerie à Dresde

« Dès 1993, le concept de l'Altmarkt-Galerie d'aujourd'hui a été remporté l'appel d'offres pour le réaménagement de la place. Après son achèvement en 2002, le centre commercial a reçu un autre prix : le ministère de l'Environnement et de l'Agriculture du Land de Saxe a désigné le centre commercial lauréat du concours « Jardins dans la ville 2000-2004 ».

Depuis lors, le complexe de trois bâtiments est devenu un centre économique et social important. Compte tenu de son grand succès économique, le centre commercial a été agrandi de 18 000 m² en mars 2011 pour obtenir au final 48 000 m² de surface commerciale. En plus de la rénovation du centre, un hôtel et des bureaux supplémentaires ont été construits au-dessus de la galerie marchande.

Parallèlement à l'agrandissement du complexe de bâtiments, il a également fallu étendre l'installation frigorifique existante. Le bureau d'études IPRO à Dresde s'est tourné vers Güntner. Ensemble, ils ont trouvé une solution pour le positionnement quelque peu inhabituel des aéroréfrigérants, ce qui était nécessaire en raison de l'architecture du bâtiment. Ce plan a ensuite

été mis en pratique par l'entreprise en charge de la construction de l'installation, YIT Germany GmbH, filiale de Dresde.

L'aspect visuel posait un problème particulier dans ce cas, car une partie des chambres de l'hôtel construit au-dessus du centre commercial lors de l'agrandissement se trouvait en face des aéroréfrigérants. C'est pourquoi une protection extérieure contre les regards indiscrets a été installée sur les appareils, qui les protège sans nuire à la vue sur la vieille ville de Dresde.

Afin de fournir la capacité totale de refroidissement de 4 740 kW, 20 aéroréfrigérants sont nécessaires, qui ne sont pas installés sur une surface horizontale, mais sont en position inclinée en fonction de l'angle du toit. Les aéroréfrigérants de la gamme GFH ont été positionnés sur des sous-structures de grande superficie pour assurer une alimentation en air suffisante. Toute la surface du toit a été utilisée pour l'alimentation en air et l'évacuation d'air. Les aéroréfrigérants alimentent deux groupes d'eau glacée installés au sous-sol du bâtiment. » [13]

Schéma 28 : Galerie-Altmarkt à Dresde, aéroréfrigérant, installation frigorifique avec et sans protection extérieure contre les regards indiscrets (source : Güntner GmbH & Co. KG.)

Bien que le projet présenté ici ne soit pas un système de pompe à chaleur innovant, mais une installation frigorifique traditionnelle, le projet montre de manière saisissante que des mesures simples, mais intelligentes peuvent intégrer habilement des systèmes techniques. L'œil non averti ne devrait pas être en mesure de voir qu'une multitude d'aéroréfrigérants imposants sont dissimulés derrière la grille de protection extérieure contre les regards indiscrets de la couleur du toit.

6.1.6 Système de climatisation du Palais fédéral à Berne

« Au Palais fédéral à Berne, les machines frigorifiques sur mesure de CTA garantissent un climat ambiant agréable même par temps chaud. Les solutions de réfrigération modernes, mises en œuvre dans le cadre de travaux de rénovation de grande envergure, s'intègrent parfaitement dans les bâtiments historiques, et leur rentabilité et faible consommation d'énergie sont convaincantes.

Le Palais fédéral fait partie des bâtiments historiques les plus importants de Suisse et de la liste des biens culturels d'importance nationale. Le Palais fédéral domine aujourd'hui de manière impressionnante la vieille ville de Berne, l'objectif de la construction du nouveau « Palais du Conseil fédéral » de la Confédération était d'être fonctionnel. Une technique du bâtiment fiable était plus importante que la splendeur - et le complexe de bâtiments disposait déjà d'une « excellente installation de chauffage et de ventilation » il y a plus de 100 ans, comme le rapportait avec enthousiasme la revue Schweizerische Bauzeitung en 1902.

Environ 100 ans après sa construction, la première rénovation en profondeur du Palais fédéral a commencé en 2006. Les ailes ouest et est ont été rénovées consécutivement. La rénovation s'est achevée par l'aile nord du Palais, située en face dans un complexe de bâtiments séparé. Les rénovations de bâtiments classés et la remise à neuf de la technologie du bâtiment imposent de strictes exigences à toutes les entreprises concernées. La technique de réfrigération, également nécessaire, n'existe généralement pas encore dans les bâtiments historiques et doit, à présent, être mise en œuvre également. De bonnes solutions de réfrigération dans les bâtiments historiques nécessitent donc des systèmes sur mesure - et une grande expérience dans des environnements exigeants.

L'un des défis de la rénovation de l'aile est du Palais fédéral était de répondre aux strictes exigences de conservation des monuments du bâtiment. Par exemple, les aéroréfrigérants ont pu être placés discrètement dans le bâtiment historique avec une solution compacte et sur mesure - les unités ne mesurent que 1,45 m de haut. » [14]

Schéma 29 : Palais fédéral à Berne, aéroréfrigérant, installation frigorifique montée sous le toit avec une grille de protection extérieure contre les regards indiscrets (source : CTA AG)

Bien que le projet présenté ici, analogue au projet de la société Güntner GmbH, ne soit pas un système de pompe à chaleur innovant, mais une installation frigorifique traditionnelle, le projet montre de manière saisissante que des mesures simples, mais intelligentes peuvent intégrer habilement des systèmes techniques. L'œil non averti ne devrait pas être en mesure de voir qu'une multitude d'aéroréfrigérants imposants sont dissimulés derrière la grille de protection extérieure contre les regards indiscrets.

Si les aéroréfrigérants, qui pourraient également servir de source de chaleur pour les pompes à chaleur air-eau, sont conçus de manière à pouvoir fonctionner très silencieusement, ils ne sont ni visibles ni audibles. Les solutions présentées par Güntner et CTA sont donc considérées comme une solution extrêmement intéressante pour la future distribution des pompes à chaleur air-eau dans les zones urbaines où les bâtiments jouissent en partie d'une protection des monuments.

6.1.7 Autres projets de l'étude menée par Energie Schweiz 2018

L'étude « Remplacement du chauffage par des pompes à chaleur air-eau dans les immeubles locatifs - aperçu des projets mis en œuvre, études et financement des cantons » [15] donne un aperçu complet des systèmes de pompe à chaleur air-eau déjà mis en œuvre avec succès. Certains des projets énumérés sont en partie situés dans des zones urbaines et considérés comme pertinents pour cette étude. Les paragraphes suivants donnent les exemples de projets les plus importants de

l'étude [15].

6.1.7.1 Pompe à chaleur compacte installée à l'extérieur, canton de Berne

« Dans le bien-fonds de 25 ans, doté de 11 appartements locatifs, le chauffage au fioul existant a été remplacé par une pompe à chaleur air-eau installée à l'extérieur. L'enveloppe du bâtiment n'a pas été modifiée et la dissipation de chaleur continue de fonctionner via les radiateurs de chauffage existants. La pompe à chaleur est placée discrètement à l'entrée du parking souterrain. La distance par rapport au bien-fonds et vis-à-vis des bâtiments voisins est suffisante pour répondre aux exigences de l'ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB). La chaleur est transportée dans le bâtiment via une tuyauterie isolée (avec ruban chauffant électrique). » [15]

Schéma 30 : Pompe à chaleur compacte installée à l'extérieur dans le canton de Berne (source : Energie Schweiz)

Cette conception montre que les pompes à chaleur air-eau compactes standard peuvent être intégrées discrètement dans l'environnement existant. Il s'agit de l'appareil LA 60TU de Glen Dimplex avec une puissance de chauffage de 50 kW (@ A2/W35). En plus de la chaleur thermique fournie, l'eau chaude est réchauffée, grâce à une résistance électrique d'appoint.

6.1.7.2 *Pompe à chaleur compacte installée à l'extérieur, rénovation à bilan énergétique positif dans le canton de Berne*

« Les trois immeubles locatifs assemblés, construits en 1963, ont été entièrement rénovés en trois étapes annuelles conformément à la norme Minergie-P. La production de chaleur avec une pompe à chaleur et l'installation photovoltaïque de 100 kWc sur le toit en font un bâtiment à bilan énergétique positif (approvisionnement en énergie autonome de 148 %). Comme une sonde géothermique ou une pompe à chaleur souterraine n'était pas possible, le choix s'est porté sur deux pompes à chaleur air-eau extérieures, qui génèrent de la chaleur pour le chauffage et l'eau chaude. Grâce à la rénovation progressive, un grand nombre de locataires ont pu changer d'appartement en interne. [15]

Schéma 31 : Pompe à chaleur compacte installée à l'extérieur, rénovation à bilan énergétique positif dans le canton de Berne (source : Energie Schweiz)

6.1.7.3 *Pompes à chaleur installées à l'intérieur dans un bâtiment neuf à Turbenthal, canton de Zurich*

« Le lotissement Altmüli à Turbenthal se compose de cinq bâtiments dotés de 40 appartements en propriété. Deux pompes à chaleur air-eau intérieures ont été installées dans chaque bâtiment pour produire de la chaleur. L'eau chaude est produite toute l'année avec la pompe à chaleur (jusqu'à 50 °C) en combinaison avec un bloc électrique dans les réservoirs d'eau chaude (augmentation de 50 à 60 °C). Grâce aux longs conduits de ventilation, les émissions sonores sont très faibles. Une valeur de planification de 31 dB (A) a été spécifiée pour la fenêtre de référence, ce qui est à peine perceptible par l'oreille humaine. » [15]

Schéma 32 : Pompe à chaleur installée à l'intérieur d'un bâtiment neuf à Turbenthal (source : Energie Schweiz)

6.1.7.4 Pompe à chaleur intérieure compacte avec des Sauts de loups.

« Les deux sont en dur avec une architecture typique des années 80. Au début des années 2000, les fenêtres ont été partiellement remplacées ; sinon, aucune mesure de rénovation notable n'a été prise sur l'enveloppe du bâtiment. La production de chaleur existante (chaudière au fioul de 55 kW avec un chauffe-eau surélevé) a été remplacée par deux pompes à chaleur air-eau installées à l'intérieur. Afin de pouvoir installer les pompes à chaleur dans l'ancien compartiment du réservoir, de nouveaux puits de lumière ont été créés. La distribution de chaleur à l'avant et à l'arrière des bâtiments, un chauffage à eau chaude par pompage à deux tubes avec des températures de départ élevées (-8 °C/ligne d'interconnexion 53 °C), n'a pas été modifiée. » [15]

Schéma 33 : Pompe à chaleur compacte installée à l'intérieur avec de nouveaux puits de lumière, canton de Bâle (source : Energie Schweiz)

6.1.7.5 Pompe à chaleur intérieure split dans un immeuble locatif, canton de Berne

« Dans l'immeuble locatif, le chauffage au fioul a été remplacé par deux pompes à chaleur air-eau en version split. Les pompes à chaleur fournissent désormais la chaleur thermique et l'eau chaude des sept appartements, les deux unités extérieures ont été montées sur la façade et reliées aux unités intérieures par une conduite split. On a veillé à ce que la loi sur la protection contre le bruit puisse être respectée sans prendre de mesures particulières. » [15]

Schéma 34 : Pompe à chaleur split installée à l'intérieur (source : Energie Schweiz)

6.2 Synthèse des solutions existantes

Toutes les solutions systémiques identifiées au cours de la recherche ont été rassemblées dans les descriptions suivantes qui distinguent les différentes variantes, notamment concernant le concept de construction des pompes à chaleur utilisées (installation intérieure, extérieure ou version split), le type d'installation utilisé (standard ou spécifique), le type d'intégration de la pompe à chaleur dans le bâtiment (installation en annexe du bâtiment, sous le toit, sur le toit), le concept de fonctionnement (monovalent, bivalent) et concernant les autres conditions aux limites pour le chauffage du bâtiment (chauffage complet ou partiel du bâtiment).

Tableau 1 : Synthèse des projets pilotes

Bien immobilier (numéro du chapitre)	Utilisation	Type de pompe à chaleur/installation	Puissance de chauffage [kW]	Capacité de refroidissement	Installation spécifique	Installation standard	Monovalent	Bivalent
6.1.1	Chauffage, refroidissement et eau chaude sanitaire (ECS) partiels	Pompe à chaleur compacte/extérieure, installation sur le toit	30			X	X	
6.1.2	Chauffage et ECS complets	Pompe à chaleur compacte/extérieure, installation sur le toit	186			X		X
6.1.3	Sans objet	Pompe à chaleur split/ évaporateur sous le toit			X			
6.1.4	Sans objet	Pompe à chaleur compacte/ intérieure, sous le toit	44			X		X
6.1.5	Refroidissement	Split/aéroréfrigérant sous le toit		4740		X	X	
6.1.6	Refroidissement	Split/aéroréfrigérant sous le toit		64	X		X	
6.1.7.1	Chauffage et ECS complets	Pompe à chaleur compacte/ extérieure, jardin	50			X	X	
6.1.7.2	Chauffage et ECS complets	Pompe à chaleur compacte/ extérieure, jardin	48			X	X	
6.1.7.3	Chauffage et ECS complets	Pompe à chaleur compacte/intérieure, sous-sol	45			X		X
6.1.7.4	Chauffage et ECS complets	Pompe à chaleur compacte/intérieure, sous-sol	38,8			X	X	
6.1.7.5	Chauffage et ECS complets	Pompe à chaleur split/évaporateur dans le jardin	46			X	X	

6.2.1 Grille morphologique. Caractéristiques des systèmes mis en œuvre

Dans le cadre de la recherche, un grand nombre de systèmes dotés de pompes à chaleur air-eau déjà mis en œuvre avec succès dans les zones urbaines ont pu être identifiés. Dans le but de déduire des solutions généralement applicables, les principales caractéristiques des systèmes déjà mis en œuvre ont été classées par catégories et présentées dans une grille morphologique. Le tableau suivant récapitule les différentes caractéristiques des systèmes de pompe à chaleur air-eau décrits, déjà mis en œuvre avec succès dans les zones urbaines.

Tableau 2 : Grille morphologique avec les principales caractéristiques des solutions déjà utilisées actuellement pour l'utilisation des pompes à chaleur air-eau en milieu urbain.

	Caractéristique A	**Caractéristique B**	**Caractéristique C**	**Caractéristique D**	**Caractéristique E**
Type construction de la pompe à chaleur	Pompe à chaleur compacte pour une installation extérieure	Pompe à chaleur compacte pour une installation intérieure	Pompe à chaleur compacte pour une installation intérieure ou pompe à chaleur split	Pompe à chaleur compacte ou split	Pompe à chaleur compacte pour une installation extérieure
Type d'installation	Installation standard	Installation standard	Installation standard	Installation standard	Installation standard
Intégration dans le bâtiment	Installation dans le jardin/à l'extérieur	Installation au sous-sol	Installation sous le toit	Installation sous le toit	Installation sous le toit
Concept de fonctionnement	Monovalent	Monovalent ou bivalent	Monovalent ou bivalent	Monovalent ou bivalent	Monovalent ou bivalent
Autres contraintes	Chauffage complet du bâtiment	Chauffage complet du bâtiment	Chauffage complet du bâtiment	Chauffage complet du bâtiment	Chauffage complet ou partiel du bâtiment

6.2.2 Caractéristique A - installation extérieure dans le jardin, pompes à chaleur compactes standard, fonctionnement monovalent, chauffage complet du bâtiment

La caractéristique A est basée sur l'utilisation de pompes à chaleur compactes standard qui sont installées dans le jardin ou à l'extérieur du bâtiment. La puissance de chauffage nécessaire peut être fournie par une seule pompe à chaleur ou par plusieurs pompes à chaleur en cascade. L'utilisation de plusieurs pompes à chaleur standard en cascade peut améliorer la possibilité de réglage et la sécurité de fonctionnement. Lorsqu'elles sont mises en œuvre d'après la caractéristique A, les pompes à chaleur fonctionnent de manière monovalente et chauffent tout le bâtiment de manière avantageuse (le mode de fonctionnement bivalent est toutefois possible aussi).

L'installation extérieure de pompes à chaleur dans le jardin est une solution économique pour la rénovation du chauffage à l'aide de pompes à chaleur air-eau. Dans les zones urbaines, l'installation traditionnelle de pompes à chaleur dans le jardin en extérieur est souvent impossible en raison du fait qu'il y a souvent peu ou pas de jardin ou d'autres espaces extérieurs exploitables. L'installation extérieure dans le jardin en cas de petites surfaces de jardin peut également être rendue plus difficile, voire impossible, en raison des exigences de protection contre le bruit applicables. Des boîtiers ou des coffrages à isolation acoustique optimale peuvent apporter une solution à ce problème, mais cela peut engendrer un surcoût considérable.

6.2.3 Caractéristique B - installation intérieure au sous-sol, pompes à chaleur compactes standard, fonctionnement monovalent ou bivalent parallèle, chauffage complet du bâtiment

Lors de la mise en œuvre de la caractéristique B, les pompes à chaleur compactes standard utilisées sont installées au sous-sol du bâtiment. La puissance de chauffage requise peut être fournie par une seule pompe à chaleur ou par plusieurs pompes à chaleur en cascade. Les pompes à chaleur peuvent être bivalentes ou fonctionner en parallèle, et chauffer tout le bâtiment.

Lors de l'utilisation de pompes à chaleur air-eau intérieures, l'air ambiant est aspiré et évacué à travers des conduits de ventilation calorifugés et insonorisés et des cavités bien dimensionnées dans les surfaces de la façade et les éventuels puits de lumière nécessaires. En raison du faible niveau de visibilité, cette variante d'installation peut représenter une solution avantageuse en termes de protection des monuments. Le respect des exigences en matière de protection acoustique est généralement possible lors de l'utilisation de conduits de ventilation insonorisés et si des puits de lumière avec des coulisses insonorisants sont utilisés.

6.2.4 Caractéristique C - installation intérieure sous le toit, pompes à chaleur standard en version compacte ou split, fonctionnement monovalent ou bivalent parallèle, chauffage complet du bâtiment

La caractéristique C est basée sur l'utilisation de pompes à chaleur standard en version compacte ou split sous le toit du bâtiment et qui ne sont pas visibles de l'extérieur. Les pompes à chaleur fonctionnent de manière bivalente ou monovalente. Lors de l'utilisation d'installations compactes, l'air ambiant est aspiré et évacué via des conduits de ventilation insonorisés et calorifugés et des cavités bien dimensionnées dans les surfaces du toit avec des grilles de protection contre les intempéries de la couleur du toit. Cette variante peut être efficace en termes de protection de monument. Si des installations en version split sont utilisées sans intégrer l'unité d'évaporateur sous le toit à l'aide de conduits de ventilation, l'ensemble du grenier doit être rendu étanche et calorifugé, ce qui peut engendrer un surcoût considérable pour les mesures structurelles nécessaires. Il faut également vérifier si la statique du bâtiment permet d'introduire des masses supplémentaires dans le grenier.

6.2.5 Caractéristique D - installation intérieure sous le toit, pompes à chaleur spécifiques en version split, fonctionnement monovalent ou bivalent parallèle, chauffage complet du bâtiment

La caractéristique D correspond en grande partie à la caractéristique C, mais est basée sur l'utilisation de pompes à chaleur spécifiques en version compacte ou split sous le toit du bâtiment et qui ne sont pas visibles de l'extérieur. L'utilisation de pompes à chaleur spécifiques à la place des pompes à chaleur standard offre une plus grande flexibilité en termes d'installation sous le toit. Les conditions spatiales souvent difficiles dans le grenier du bâtiment peuvent ainsi être réglées en fonction de la situation, ce qui n'est possible que dans certaines conditions avec l'utilisation de pompes à chaleur standard.

6.2.6 Caractéristique E - installation extérieure sur le toit, pompe à chaleur compacte standard, fonctionnement monovalent ou bivalent parallèle, chauffage complet ou partiel du bâtiment

La caractéristique E se distingue par l'utilisation de standard en version compacte sur le toit du bâtiment. La puissance de chauffage nécessaire peut être fournie par une seule pompe à chaleur ou par plusieurs pompes à chaleur en cascade.

L'installation à l'extérieur de pompes à chaleur compactes sur le toit du bâtiment peut entraîner des charges statiques considérables et nécessite des tests de situation et d'éventuelles améliorations de la statique du bâtiment. Dans ce contexte, cette caractéristique tente de manière ciblée de réduire autant que possible le niveau de puissance de la pompe à chaleur afin que des pompes à chaleur plus petites et plus légères puissent être utilisées. Par exemple, la puissance de chauffage requise de la pompe à chaleur peut être réduite par un chauffage partiel, mais monovalent du bâtiment. Alternativement, la pompe à chaleur peut chauffer les pompes à chaleur Saumure-eau de tout le bâtiment en mode bivalent. Les deux mesures peuvent conduire à une réduction significative du niveau de puissance nécessaire des pompes à chaleur et donc à une atténuation des exigences statiques lors de l'installation sur le toit.

Afin de réduire les émissions sonores et à titre de protection extérieure contre les regards indiscrets, les pompes à chaleur sont de manière utile entourées de panneaux préfabriqués insonorisants lorsqu'elles sont installées à l'extérieur sur le toit du bâtiment.

7 Bâtiments types de la ville de Zurich

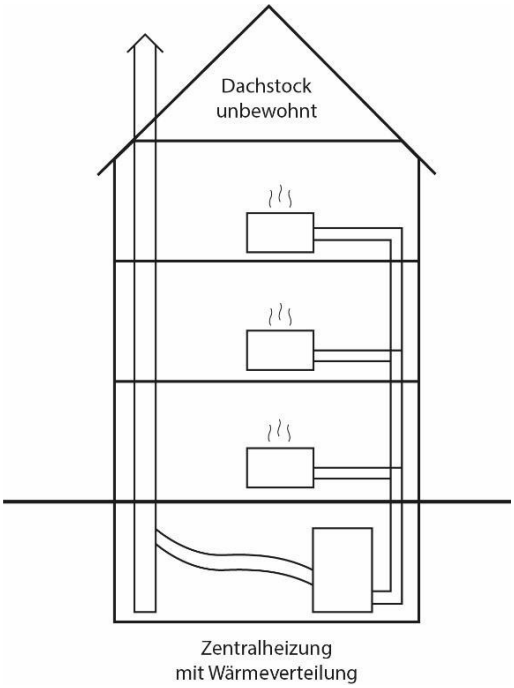
Dans le cadre de l'étude, différents bâtiments types ont été sélectionnés dans le parc immobilier de la ville de Zurich et leurs caractéristiques ont été analysées de manière approfondie. Le but de ces analyses est de définir les caractéristiques typiques des bâtiments, qui doivent être prises en compte lors de la recherche d'une solution pour l'installation et le fonctionnement des pompes à chaleur air-eau. Les bâtiments types ont été sélectionnés sur la base des critères suivants :

- Trois à quatre étages
- Non rénové
- Besoin de puissance de chauffage entre 50 et 100 kW
- Pas ou petit terrain propriété adjacente

7.1 Rue Hofwiesenstrasse 126

Les principales caractéristiques du bâtiment situé à Hofwiesenstrasse 126 sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Toit	Toit sans proportion de toiture plate
Grenier	Inoccupé, hauteur réduite, chape
Chauffage	Central, fioul
Eau chaude	Système électrique décentralisé
Distribution de la chaleur	Radiateurs
Température maximale	60 °C pour A-10
Puissance de chauffage requise	40 kW environ pour A-8
Alimentation électrique	60 A, 400 VAC
Zone	W3 – zone d'habitation sur 3 étages
Niveau de sensibilité	III
Adéquation pour une pompe chaleur	Bonne



Grenier inoccupé/Chauffage central avec distribution de la chaleur

Schéma 35 : Rue Hofwiesenstrasse 126 - bâtiment avec des combles inoccupés, toit sans proportion de toiture plate, production de chaleur centrale avec distribution de chaleur

Le bâtiment situé à Hofwiesenstrasse 126 dispose de combles accessibles et inoccupés qui peuvent être utilisés par les résidents à titre de combles et de local séchage du linge. Si les résidents acceptent les déperditions, il est généralement possible d'installer des pompes à chaleur au grenier. Le principal défi est la hauteur totale parfois très limitée du grenier en raison de la structure du toit à pignon, qui peut rendre l'installation d'une pompe à chaleur intérieure traditionnelle dans le grenier beaucoup plus difficile. Le bâtiment a un toit à pignon sans proportion de toiture plate. Cela complique l'installation de pompes à chaleur sur le toit.

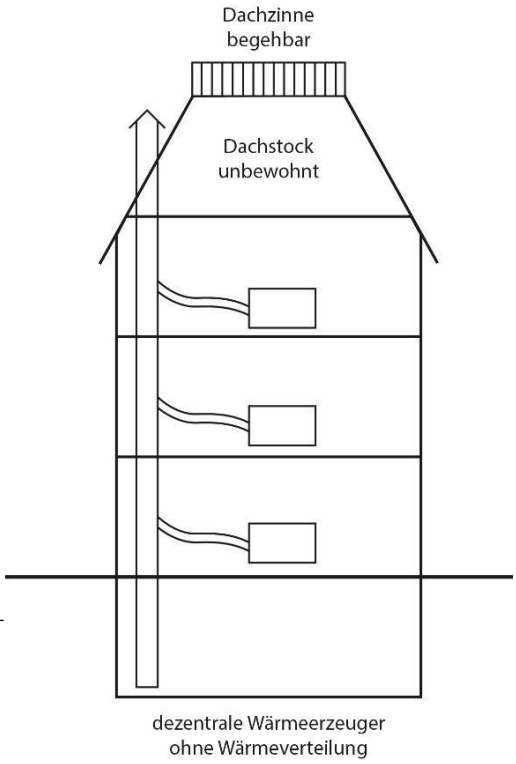
Le bâtiment dispose actuellement d'un chauffage central au fuel pour fournir le chauffage. La chaleur est distribuée par des radiateurs avec une température de départ maximale requise de 60 °C à une température ambiante de -10 °C. Le bâtiment dispose également d'une ventilation, ce qui nécessite le préchauffage de l'air frais par le biais du système de chauffage. L'eau chaude est actuellement fournie par des chaudières électriques décentralisées. Il est prévu de centraliser la production d'eau chaude dans le cadre d'une rénovation globale du bâtiment. Le bâtiment dispose d'une ligne d'alimentation électrique avec une protection par fusibles de 60 A à 400 V. Pour le fonctionnement d'une pompe à chaleur, selon le mode de fonctionnement et la conception de la pompe à chaleur, une rénovation ou une extension de l'alimentation électrique peut être nécessaire.

Le bâtiment ne se trouve ni dans une zone de conservation de quartiers ni ne figure sur la liste de conservation des monuments historiques. Cela signifie que le bâtiment n'est soumis à aucune exigence particulière concernant les adaptations structurelles du toit ou de la façade.

7.2 Rue Müllerstrasse 34

Les principales caractéristiques du bâtiment situé à Müllerstrasse 34 sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Toit	Toit avec proportion de toiture plate - accessible et avec balcon
Grenier	Inoccupé, hauteur réduite, chape
Chauffage	Décentralisé, au gaz/fioul
Eau chaude	Système électrique décentralisé
Distribution de la chaleur	Aucune
Température maximale	-
Puissance de chauffage requise	70 kW environ
Alimentation électrique	80 A, 400 VAC
Zone	Zone de conservation de quartiers 5a
Niveau de sensibilité	III
Adéquation pour une pompe à chaleur	Moyenne



Corniches accessibles/Grenier inoccupé/Production de chaleur décentralisée sans distribution de chaleur

Schéma 36 : Rue Müllerstrasse 34 - bâtiment avec combles inoccupés, toit avec balcon accessible sur une proportion de la toiture plate, production de chaleur décentralisée sans distribution de chaleur

Le bâtiment situé à Müllerstrasse 34 a des combles accessibles et inoccupés qui peuvent être utilisés à titre de combles par les résidents. Si les résidents venaient à accepter les déperditions, il serait possible d'installer des pompes à chaleur au grenier. Le principal défi est la hauteur totale limitée du grenier avec une hauteur d'environ 1,7 m, ce qui peut rendre l'installation d'une pompe à chaleur intérieure traditionnelle au grenier beaucoup plus difficile. Le bâtiment a également un toit avec une proportion de toiture plate faisant office de corniches. La proportion de toiture accessible pourrait également être utilisée pour installer une pompe à chaleur air-eau, mais elle devrait, si possible, être toujours mise à la disposition des résidents.

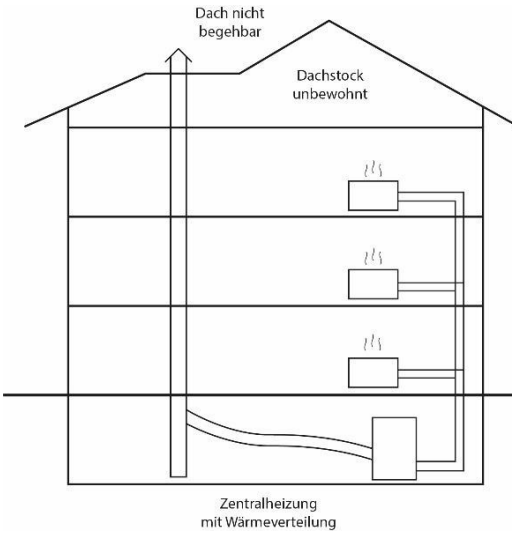
Étant donné que le bâtiment a décentralisé les chaudières à gaz et les poêles au mazout sans distribution de chaleur, une rénovation d'une distribution de chaleur serait essentielle pour l'installation d'un système de pompe à chaleur. La rénovation ou l'extension de l'alimentation électrique à 100 A à 400 V serait également nécessaire pour le fonctionnement d'une pompe à chaleur, en fonction du mode de fonctionnement et de la conception de la pompe à chaleur.

En raison de l'emplacement du bâtiment dans une zone de conservation de quartiers, des réglementations plus strictes s'appliquent à la conception de la toiture, ce qui peut rendre encore plus difficile l'installation de pompes à chaleur sur le toit.

7.3 Rue Kruggasse 8

Les principales caractéristiques du bâtiment situé à Kruggasse 8 sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Toit	Toit incliné sans proportion de toiture plate - inaccessible
Grenier	Partiellement occupé, hauteur réduite
Chauffage	Central au gaz
Eau chaude	Système central au gaz/électrique
Distribution de la chaleur	Radiateurs
Température maximale	60 °C pour A-10
Puissance de chauffage requise	35 kW environ
Alimentation électrique	80 A, 400 VAC
Zone	Zone du centre, classée
Niveau de sensibilité	III
Adéquation pour une pompe à chaleur	Faible



Toit inaccessible/Grenier inoccupé/Chauffage central avec distribution de la chaleur

Schéma 37 : Rue Kruggasse 8 - bâtiment avec des combles partiellement occupés, toit incliné sans proportion de toiture plate inaccessible, production de chaleur centrale avec distribution de la chaleur.

Le bâtiment situé à Kruggasse 8 correspond à un bâtiment typique de l'Oberdorf à Zurich. Le toit à pignon du bâtiment a plusieurs marches de toit et est en principe inaccessible. Le toit de l'immeuble ne dispose que d'une surface plane de 4 m² environ faisant office de balcon commun. L'installation d'une pompe à chaleur air-eau sur le toit est difficile en raison de la structure du toit incliné et de la très faible superficie du balcon commun. L'installation de pompes à chaleur air-eau dans les combles du bâtiment risque également d'être difficile, car ces derniers sont partiellement occupés, ce qui réduit considérablement leur hauteur totale. Le bâtiment dispose actuellement d'un chauffage central au gaz, qui fournit le chauffage et l'eau chaude pour les numéros 6 et 8 de la rue Kruggasse. La chaleur est distribuée par des radiateurs à une température de départ maximale requise de 60 °C environ à une température ambiante de - 10 °C. Comme dans les autres bâtiments, pour le fonctionnement d'une pompe à chaleur dans cet immeuble, un test serait nécessaire pour déterminer si la rénovation ou l'extension de l'alimentation électrique est requise.

Le bâtiment situé à Kruggasse 8, au cœur de la ville de Zurich, est un bâtiment classé. Les adaptations

de l’enveloppe du bâtiment et/ou de la toiture dans le cadre de l’installation de pompes à chaleur sont donc soumises à des réglementations strictes.

8 Solutions déduites et exigences en matière de pompes à chaleur

8.1 Objectif

Sur la base des conclusions de l'étude de marché et de la recherche de solutions et de projets pilotes déjà existants, les solutions suivantes concernant l'utilisation de pompes à chaleur air-eau dans les bâtiments en zones urbaines ont été élaborées (dans tous les cas, les aspects architecturaux tels que la protection des monuments, des zones du centre et de conservation de quartiers doivent notamment être observés).

Lors de l'élaboration des solutions déduites, il a été systématiquement veillé à ce que les objectifs suivants, qui revêtent une grande importance concernant la future distribution des pompes à chaleur air-eau dans les zones urbaines, puissent être atteints dans la mesure du possible.

- Haute efficacité énergétique avec de faibles émissions sonores
- Haute sécurité de fonctionnement avec de faibles émissions sonores
- Bonne faisabilité
- Fonctionnement le plus économique possible
- Interventions au strict minimum dans l'aspect du bâtiment

Le respect des objectifs énoncés nécessite des optimisations techniques et conceptuelles dans la conception et l'installation des systèmes de pompe à chaleur.

8.2 Aspects d'optimisation technique

Concernant la faisabilité et la rentabilité, les aspects d'optimisation suivants sont considérés comme utiles et pertinents.

8.2.1 Utilisation d'installations standard

Concernant les coûts d'investissement, les études montrent que les produits standard sont nettement moins onéreux à l'achat que les installations spécifiques. Les coûts bruts spécifiques des pompes à chaleur air-eau standard actuelles sont de l'ordre de 1 000 à 1 500 CHF par kW de puissance calorifique. En revanche, les coûts spécifiques (coûts bruts) des installations spécifiques dépassent les 2 000 CHF par kW de puissance calorifique. L'utilisation d'installations standard à la place d'installations spécifiques peut également avoir un effet positif sur les coûts de planification. Des installations spécifiques sont mises au point et fabriquées en fonction des besoins et des spécifications respectives, ce qui nécessite une planification et une communication intensives entre l'urbaniste et le fabricant. En revanche, les pompes à chaleur standard peuvent être sélectionnées dans le catalogue avec relativement peu d'effort, ce qui permet une planification plus simple et plus efficace.

L'autre avantage de l'utilisation d'installations standard peut être la sécurité de fonctionnement éventuellement accrue des installations standard grâce à des processus de production standardisés.

En résumé, l'utilisation de pompes à chaleur standard à la place d'installations spécifiques présente les avantages suivants :

- Réduction des coûts spécifiques
- Sécurité de fonctionnement accrue grâce à des processus de production standardisés
- Planification plus simple et plus efficace

Pour les raisons évoquées, les solutions avec des pompes à chaleur standard doivent être privilégiées.

8.2.2 Mise en cascade de plusieurs pompes à chaleur plus petites

L'espace disponible dans les bâtiments urbains existants étant généralement limité, des défis majeurs se posent lors de l'utilisation des pompes à chaleur air-eau en rapport avec la pose et l'installation des pompes à chaleur dans ou sur le bâtiment. Les charges par unité de surface spécifiques admissibles, parfois faibles, doivent également être respectées. Afin de faciliter la pose des appareils, plusieurs appareils standard plus petits et plus légers peuvent être montés en cascade de manière avantageuse à la place d'une grosse pompe à chaleur. Cette mesure facilite non seulement la pose, mais augmente également la flexibilité de l'installation des appareils dans ou sur le bâtiment.

L'autre avantage de l'utilisation de plusieurs pompes à chaleur en cascade peut être la sécurité de fonctionnement accrue résultant de la redondance (partielle). De plus, la possibilité de réglage de la puissance de chauffage générée peut être nettement améliorée en raison de la mise en cascade de plusieurs appareils, ce qui peut avoir un effet positif sur la conception de l'ensemble du système. Plus la puissance de chauffage générée par les pompes à chaleur peut être adaptée à la puissance de chauffage requise du bâtiment, plus le réservoir d'accumulation du système de chauffage peut être plus petit. Ce fait est important pour la pose et l'installation, mais aussi en termes de coûts d'investissement.

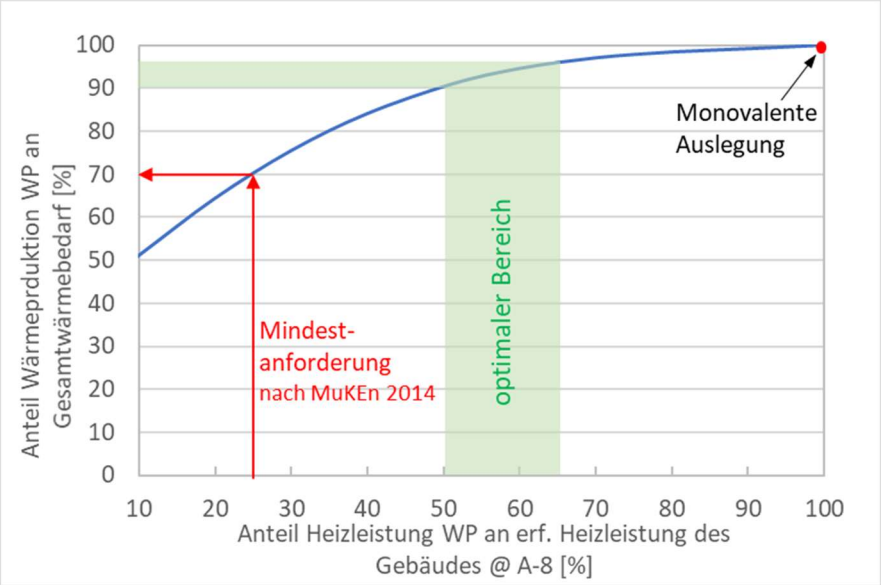
En résumé, la mise en cascade de plusieurs pompes à chaleur standard plus petites au lieu d'utiliser une grande pompe à chaleur présente les avantages suivants :

- Sécurité de fonctionnement accrue grâce à une redondance (partielle)
- Pose facilitée grâce à des dimensions plus petites et à un poids réduit
- Flexibilité d'installation accrue

Pour les raisons évoquées, les solutions avec plusieurs pompes à chaleur standard en cascade sont à privilégier au lieu d'une grande pompe à chaleur.

8.2.3 Mode de fonctionnement monovalent par opposition à bivalent des pompes à chaleur

Quelle que soit la solution en question, les pompes à chaleur peuvent assurer le chauffage monovalent de l'ensemble du bâtiment ou couplé à un système de chauffage supplémentaire, le chauffage du bâtiment est ainsi bivalent. En mode de fonctionnement bivalent, la pompe à chaleur peut être dimensionnée environ 50 % plus petite en termes de puissance thermique par rapport à un mode de fonctionnement monovalent. Malgré cette mesure, en fonction des conditions climatiques, plus de 80 % de l'énergie thermique annuelle nécessaire au chauffage et à l'eau chaude peut être fournie par la pompe à chaleur pendant la saison de chauffage (voir schéma 38).



Part de la production de chaleur de la pompe à chaleur sur le total des besoins en chaleur (en %)
Conception monovalente
Exigence minimale d'après le modèle de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC) 2014
Zone optimale
Part de la puissance de chauffage de la pompe à chaleur sur la puissance de chauffage obligatoire du bâtiment @ A – 8 (en %)

Schéma 38 : Part de la production de chaleur de la pompe à chaleur sur le total des besoins en chaleur annuels en fonction de la part de la puissance de chauffage de la pompe à chaleur sur la puissance de chauffage obligatoire du bâtiment à une température de conception de -8 °C.

Une conception bivalente de la pompe à chaleur peut ainsi non seulement atténuer le problème des émissions sonores de la pompe à chaleur, mais permet également de faciliter la pose et l'installation grâce à ses dimensions plus petites et son poids réduit. L'autre avantage du mode de fonctionnement bivalent des pompes à chaleur est la sécurité de fonctionnement accrue qui en résulte en raison de la redondance partielle. Les systèmes de chauffage bivalents avec pompes à chaleur peuvent également être intéressants si l'alimentation électrique du bâtiment limite la puissance maximale de la pompe à chaleur et que l'extension de l'alimentation électrique n'est pas possible ou implique des coûts d'investissement élevés.

Lors de la mise en œuvre d'une solution bivalente, un mode de fonctionnement bivalent parallèle est recommandé au lieu d'un mode de fonctionnement bivalent alternatif (voir chapitre 3.2). En règle générale, les systèmes de chauffage au mazout ou au gaz sont utilisés en combinaison avec des pompes à chaleur dans les systèmes bivalents pour atteindre des coûts totaux annuels minimum.

Les avantages d'un mode fonctionnement bivalent parallèle de pompes à chaleur en combinaison avec des chaudières au fioul ou au gaz peuvent être résumés ainsi :

- Amélioration de la faisabilité grâce aux éléments suivants
  - pompes à chaleur plus petites et plus légères
  - puissances connectées plus faibles
  - facilité d'utilisation des produits standard
- Sécurité de fonctionnement accrue grâce à la redondance
- Amélioration de la rentabilité

La mise en œuvre d'un mode de fonctionnement bivalent parallèle des pompes à chaleur peut donc représenter une mesure judicieuse pour améliorer la faisabilité technique et économique, notamment s'il existe une infrastructure au gaz ou au fioul.

Concernant la stratégie énergétique 2050 et l'élimination obligatoire du CO2, les solutions bivalentes ne sont généralement pas recommandées. Dans ce contexte, les solutions avec des pompes à chaleur en mode de fonctionnement monovalent doivent absolument être privilégiées.

En raison de la faisabilité nettement améliorée (coûts, pose, sécurité de fonctionnement, etc.), les solutions avec une conception bivalente de la pompe à chaleur peuvent encore présenter un intérêt à court et à moyen terme et faciliter voire permettre la future distribution des pompes à chaleur air-eau en milieu urbain.

Une solution avec des pompes à chaleur en mode de fonctionnement bivalent parallèle s'avère particulièrement intéressante si les pompes à chaleur sont conçues de manière à pouvoir assurer la fourniture monovalente du chauffage et de l'eau chaude après une rénovation globale ultérieure avec une amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment.

8.3 Aspects de l'optimisation en termes de conception

S'agissant de la faisabilité des systèmes de pompe à chaleur air-eau dans les bâtiments urbains existants, des optimisations non seulement techniques et économiques, mais également de conception doivent être effectuées. En particulier concernant un éventuel statut de protection du bâti, il est important de réduire au minimum les interventions sur la structure et l'aspect du bâtiment. Des solutions doivent être créées pour permettre un fonctionnement économiquement intéressant des futurs systèmes avec des pompes à chaleur air-eau. Dans ce contexte, les différentes solutions d'installation des pompes à chaleur élaborées visent à réduire au minimum la visibilité des composants techniques, tout en maintenant les surcoûts de mise en œuvre des systèmes aussi bas que possible.

8.3.1 Solution 1 - Installation de la pompe à chaleur dans le jardin/à l'extérieur

La solution 1 décrite ci-dessous représente l'option la plus simple et utilise une ou plusieurs pompes à chaleur air-eau ou pompes à chaleur en version split installées dans le jardin ou à l'extérieur du bâtiment.

Tableau 3 : Caractéristiques obligatoires du bâtiment pour la solution 1.

Grenier	Non pertinent
Structure du toit	Non pertinente
Jardin/espace extérieur	Espace suffisant pour l'installation de la ou des pompes à chaleur dans le respect des exigences de protection contre le bruit applicables
Sous-sol	Espace suffisant pour l'installation du réservoir d'accumulation et, le cas échéant, de la ou des unités internes de la ou des pompes à chaleur
Distribution de chaleur	Distribution de chaleur existante avec une température de départ maximale requise de 60 °C ; S'il n'existe pas de distribution de chaleur ou si la température de départ maximale requise est supérieure à 60 °C : rénovation nécessaire
Alimentation électrique	Alimentation électrique de 200 A à 400 V au total pour une pompe à chaleur d'une puissance de chauffage de 60 kW ;
	En cas d'alimentation électrique insuffisante : rénovation nécessaire ou fonctionnement bivalent avec pompe à chaleur et générateur de chaleur supplémentaire

La solution 1 utilise de manière avantageuse des pompes à chaleur standard ou, à défaut, des pompes à chaleur spécifiques pour une installation compacte ou split. Avec cette solution, les

pompes à chaleur ou, en cas d'utilisation de pompes à chaleur split, les unités extérieures des pompes à chaleur sont installées dans le jardin ou à l'extérieur du bâtiment. Si des pompes à chaleur split sont utilisées, les unités internes des pompes à chaleur sont installées de manière avantageuse au sous-sol du bâtiment, avec des longueurs de conduites les plus courtes possibles entre les unités internes et externes.

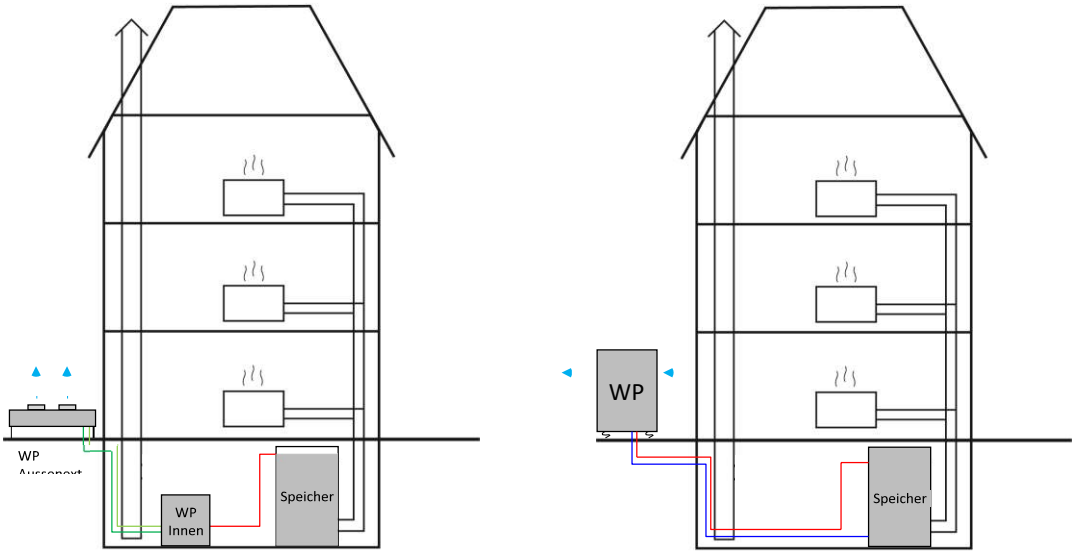


Schéma 39 : Solution 1 - Installation d'une pompe à chaleur split (à gauche) ou compacte (à droite) dans le jardin ou à l'extérieur.

S'agissant des nuisances sonores de la pompe à chaleur, il faut veiller à ce que, lors de l'utilisation de pompes à chaleur compactes, des appareils dotés des boîtiers insonorisés autant que possible soient utilisés, de sorte que le bruit transmis par l'air puisse être efficacement empêché de se propager sur les surfaces du boîtier des pompes à chaleur. En cas d'utilisation de pompes à chaleur split, il est avantageux d'utiliser des unités extérieures de grandes dimensions avec des ventilateurs à régime lent pour obtenir un fonctionnement extrêmement silencieux sans bruits d'écoulement gênants. Le dimensionnement correct des unités extérieures permet ainsi d'atteindre des niveaux de puissance acoustique de l'unité extérieure inférieurs à 50 dB (A), ce qui rend les mesures supplémentaires de protection contre le bruit superflues.

Afin de compenser les éventuels temps de blocage de la pompe à chaleur par l'entreprise d'approvisionnement en énergie, le système de chauffage doit obligatoirement être équipé d'un réservoir d'accumulation suffisamment dimensionné. Compte tenu de la masse importante des réservoirs, le réservoir d'accumulation est installé de manière avantageuse au sous-sol du bâtiment.

La pose des conduites d'eau ou split entre le sous-sol et la pompe à chaleur dans le jardin doit se faire dans le sol. Il est important de s'assurer que les réglementations relatives aux épaisseurs d'isolation applicables à l'isolation thermique des conduites souterraines soient systématiquement respectées.

Le schéma 40 ci-dessous montre une mise en œuvre possible de la solution 1 basée sur le bâtiment situé à Hofwiesenstrasse 126, Zurich (cf. chapitre 10.1).

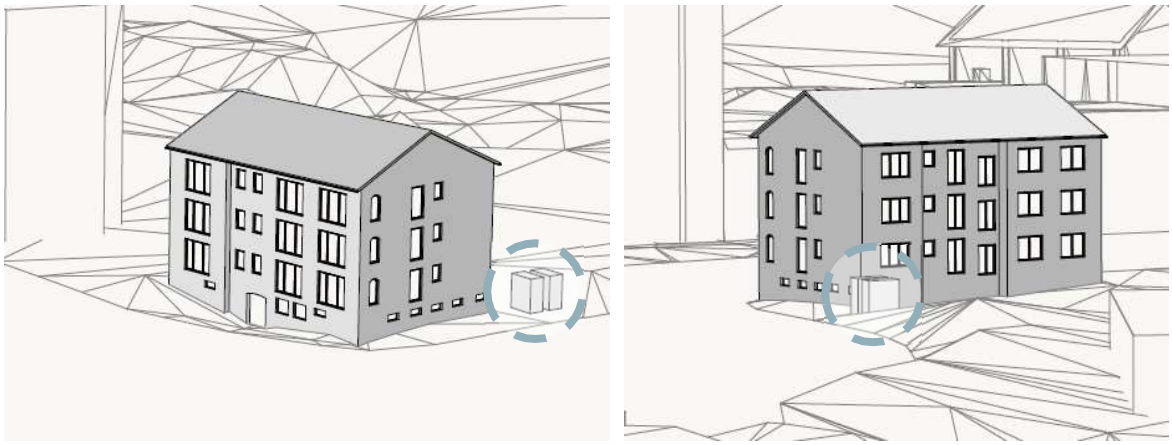


Schéma 40 : Solution 1 - visualisation de la solution 1 basée sur le bâtiment situé à Hofwiesenstrasse 126, Zurich.

8.3.2 Solution 2 - Installation de la pompe à chaleur au sous-sol/rez-de-chaussée

La solution décrite ci-dessous représente une alternative relativement simple à la solution 1 et utilise une ou plusieurs pompes à chaleur air-eau installées au sous-sol du bâtiment.

Tableau 4 : Caractéristiques obligatoires du bâtiment, solution 2.

Grenier	Non pertinent
Structure du toit	Non pertinente
Jardin/espace extérieur	Espace disponible suffisant pour concevoir des entrées et des sorties d'air sous forme de puits de lumière ou de grilles de protection contre les intempéries sur la façade du bâtiment dans le respect de la réglementation en vigueur en matière de protection contre le bruit
Locaux du sous-sol	Espace disponible suffisant pour l'installation de la ou des pompes à chaleur et du réservoir d'accumulation
Distribution de chaleur	Distribution de chaleur existante à une température de départ maximale requise de 60 °C ; S'il n'existe pas de distribution de chaleur ou si la température de départ maximale requise est supérieure à 60 °C : rénovation nécessaire
Alimentation électrique	Alimentation électrique de 200 A à 400 V au total pour une pompe à chaleur d'une puissance de chauffage de 60 kW ;

	En cas d'alimentation électrique insuffisante : rénovation nécessaire ou fonctionnement bivalent avec pompe à chaleur et générateur de chaleur supplémentaire

La solution 2 utilise de manière avantageuse des pompes à chaleur standard ou, à défaut, des pompes à chaleur spécifiques pour une installation intérieure compacte. Cette solution qui consiste à installer les pompes à chaleur au sous-sol ou au rez-de-chaussée du bâtiment est intéressante en termes de protection des monuments. L'air ambiant est aspiré et évacué à travers des conduits de ventilation de grande section transversale, insonorisés et isolés thermiquement et des cavités de grandes dimensions dans la façade ou à travers des puits de lumière de larges dimensions. Toutes les cavités dans les façades peuvent être dotées de grilles de protection contre les intempéries de la couleur de la façade afin qu'elles ne puissent être immédiatement identifiées comme des ouvertures de l'extérieur. Pour éviter les bruits d'écoulement, les conduits de ventilation, les cavités des façades et les puits de lumière doivent être dimensionnés de sorte à ne pas dépasser une vitesse de l'air maximale de 2,5 m/s. En cas d'utilisation d'une pompe à chaleur air-eau avec une puissance de chauffage de 60 kW à une température ambiante de -7 °C, la section transversale d'écoulement minimale requise des conduits de ventilation est de 5 m² environ et les cavités dans les façades ou les puits de lumière sont d'une surface de 5 m².

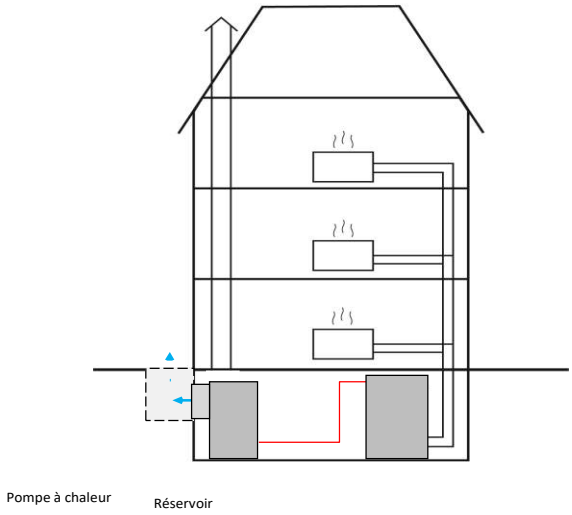


Schéma 41 : Solution 2 - installation d'une pompe à chaleur compacte dans une cave.

Afin de compenser les éventuels temps de blocage de la pompe à chaleur par l'entreprise d'approvisionnement en énergie, le système de chauffage doit être doté d'un réservoir d'accumulation suffisamment dimensionné. Compte tenu de la masse importante des réservoirs, le réservoir d'accumulation est également installé de manière avantageuse au sous-sol du bâtiment.

Un découplage parfait des bruits de structure entre la pompe à chaleur et la structure du bâtiment est extrêmement important pour l'installation intérieure des pompes à chaleur air-eau. Seul un découplage optimal du bruit transmis par la structure permet d'éviter la propagation du bruit à l'intérieur du bâtiment lorsque la pompe à chaleur fonctionne. De plus, des pompes à chaleur dont les boîtiers sont insonorisés autant que possible doivent être utilisées pour empêcher efficacement la propagation du bruit transmis par l'air sur les surfaces du boîtier des pompes à chaleur.

Le schéma 42 montre les mises en œuvre possibles de la solution 2 basée sur les bâtiments situés à

Hofwiesenstrasse 126, Zurich et Müllerstrasse 34, Zurich (voir les chapitres 10.1 et 10.2).

Schéma 42 : Solution 2 - visualisation de la solution 2 basée sur les bâtiments situés à Hofwiesenstrasse 126, Zurich (à gauche) et à Müllerstrasse 34, Zurich (à droite).

8.3.3 Solution 3 – installation de la pompe à chaleur au grenier

La solution 3 décrite ci-dessous utilise une ou plusieurs pompes à chaleur air-eau installées au grenier du bâtiment.

Tableau 5 : Caractéristiques obligatoires du bâtiment, solution 3.

Grenier	Inoccupé, idéalement non utilisé à titre de combles et hauteur minimale idéale > 1,9 m Charge par unité de surface admissible > 500 kg/m² (sinon, des mesures appropriées sont nécessaires pour introduire le poids dans la structure du bâtiment)
Structure du toit	Charge de surface admissible > 500 kg/m² (sinon, des mesures appropriées sont nécessaires pour introduire le poids dans la structure du bâtiment)
Jardin/espace extérieur	Non pertinent
Locaux du sous-sol	Espace disponible suffisant pour l'installation du réservoir d'accumulation et, le cas échéant, de la ou des unités internes, de la ou des pompes à chaleur
Distribution de chaleur	Distribution de chaleur existante à une température de départ maximale requise de 60 °C ; S'il n'existe pas de distribution de chaleur ou si la température de départ maximale requise est supérieure à 60 °C : rénovation nécessaire

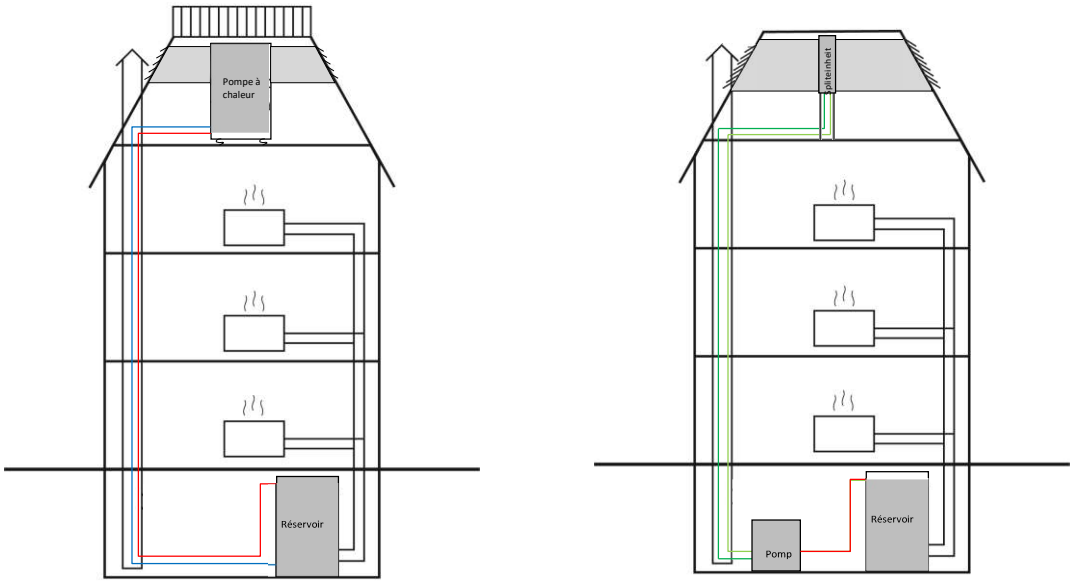
Alimentation électrique	Alimentation électrique de 200 A à 400 V au total pour une pompe à chaleur d'une puissance de chauffage de 60 kW ; En cas d'alimentation électrique insuffisante : rénovation nécessaire ou fonctionnement bivalent avec pompe à chaleur et générateur de chaleur supplémentaire

La solution utilise des pompes à chaleur standard ou spécifiques installées à l'intérieur en version compacte, sous le toit du bâtiment. Avec cette solution, les pompes à chaleur ne sont pas visibles de l'extérieur, ce qui est une solution justifiable pour intégrer la pompe à chaleur dans le cadre de la conservation des monuments historiques. L'air ambiant est aspiré et évacué par des conduits de ventilation de grande section transversale, insonorisés et isolés thermiquement et des cavités de grandes dimensions dans les surfaces du toit. À l'instar des concepts décrits au chapitre 6, les cavités dans les surfaces du toit peuvent être dotées de grilles de protection contre les intempéries de la couleur du toit afin qu'elles ne puissent être identifiées comme des ouvertures de l'extérieur. Pour éviter les bruits d'écoulement, les conduits de ventilation et les cavités dans les surfaces du toit doivent être dimensionnés de sorte à ne pas dépasser une vitesse de l'air maximale de 2,5 m/s. En cas d'utilisation d'une pompe à chaleur air-eau d'une puissance thermique de 60 kW à une température ambiante de -7 °C, la section transversale d'écoulement minimale requise des conduits de ventilation est de 5 m² environ et deux cavités de toit d'une superficie de 5 m² chacune.

Afin de compenser les éventuels temps de blocage de la pompe à chaleur par l'entreprise d'approvisionnement en énergie, le système de chauffage doit être doté d'un réservoir d'accumulation suffisamment dimensionné. Compte tenu de la masse importante des réservoirs, les réservoirs d'accumulation sont installés de manière avantageuse au sous-sol du bâtiment. Lors de la mise en œuvre d'un système de chauffage monovalent avec des pompes à chaleur air-eau, les conduites d'aller et de retour des pompes à chaleur (entre le réservoir et la pompe à chaleur) peuvent facilement être posées à travers les cheminées existantes du bâtiment, qui ne sont plus nécessaires compte tenu de la rénovation du chauffage. Si la rénovation du chauffage nécessite la mise en place d'un système de chauffage bivalent avec des pompes à chaleur air-eau et des générateurs de chaleur supplémentaires, l'utilisation des cheminées existantes pour la pose des conduites de la pompe à chaleur peut s'avérer impossible.

Un découplage parfait des bruits de structure entre la pompe à chaleur et la structure du bâtiment est extrêmement important pour l'installation intérieure des pompes à chaleur air-eau. Seul un découplage optimal du bruit transmis par la structure permet d'éviter la propagation du bruit à l'intérieur du bâtiment lorsque la pompe à chaleur fonctionne. Les pompes à chaleur doivent également être utilisées avec des boîtiers insonorisés autant que possible afin que la propagation du bruit transmis par l'air sur les surfaces du boîtier des pompes à chaleur soit empêchée avec efficacité.

Si des pompes à chaleur sont installées à l'intérieur dans le grenier du bâtiment, la statique du bâtiment doit être vérifiée en conséquence. Des mesures structurelles pour améliorer la statique du bâtiment sont nécessaires.



WP Innen : Pompe à chaleur intérieure
Spliteinheit : Unité intérieure

Schéma 43 : Solution 3 - Installation de la pompe à chaleur en version compacte (à gauche) ou split (à droite) dans le grenier.

Au lieu d'utiliser des pompes à chaleur compactes installées à l'intérieur, des installations split peuvent également être utilisées lors de la mise en œuvre de la solution 3. L'« unité extérieure » est installée sous le grenier du bâtiment, tandis que l'unité intérieure peut, par exemple, être installée et utilisée au sous-sol du bâtiment.

La mise en œuvre de la solution 3 utilisant des installations split n'est considérée comme judicieuse que si des installations split à liaison hydraulique peuvent être utilisées. Le fonctionnement avec des installations split traditionnelles à réfrigérant peut entraîner des problèmes de fonctionnement des pompes à chaleur en raison des grandes différences de hauteur entre les appareils. De plus, cette solution n'est judicieuse que lorsque l'appareil split est intégré à l'aide de conduits de ventilation, de sorte que toute la section du grenier dans laquelle l'unité extérieure est installée n'a pas à être isolée thermiquement et étanchée.

Les avantages de l'utilisation d'installations split sont la réduction possible du bruit et du poids de la structure dans le grenier. Les inconvénients peuvent être l'installation complexe et la bonne isolation nécessaire des conduites split (éviter la condensation). En outre, il n'existe actuellement aucun produit standard adapté à la mise en œuvre de cette solution.

Le schéma 44 montre des versions possibles de la solution basées sur les bâtiments situés à Hofwiesenstrasse 126, Zurich (voir chapitre 10.1) et à Müllerstrasse 34, Zurich (voir chapitre 10.2).

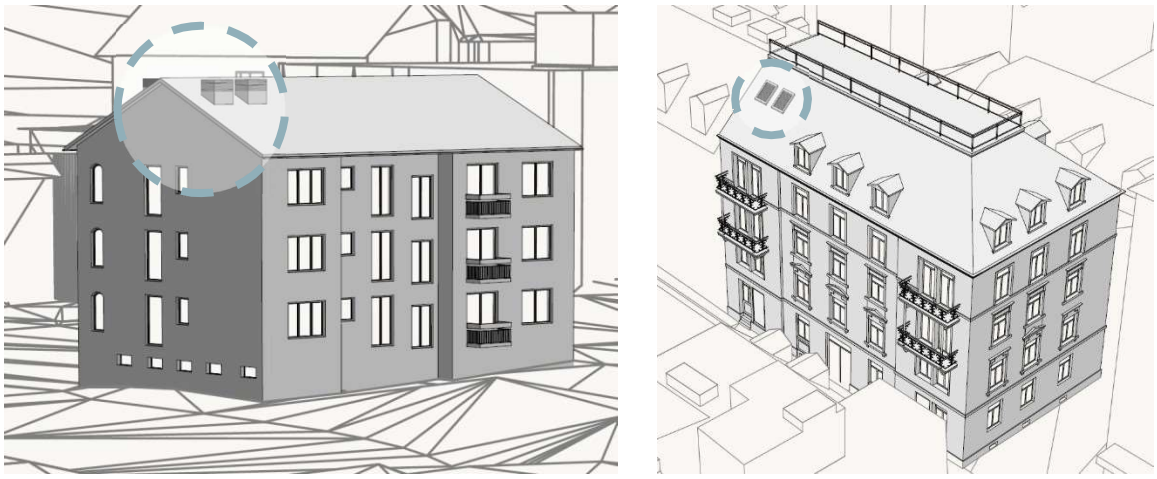


Schéma 44 : Solution 3 - visualisation de la solution 3 basée sur les bâtiments situés à Hofwiesenstrasse 126, Zurich (à gauche) et à Müllerstrasse 34, Zurich (à droite).

8.3.4 Solution 4 - Installation de la pompe à chaleur sur le toit - version split

Si une mise en œuvre de la solution 3 décrite avec des pompes à chaleur air-eau installées dans le grenier n'est pas possible, car il est occupé, trop petit ou inadapté, dans ce cas la solution 4 décrite ci-dessous propose une alternative envisageable. La solution 4 utilise une ou plusieurs pompes à chaleur air-eau split installées sur le toit du bâtiment.

Tableau 6 : Caractéristiques obligatoires du bâtiment, solution 4.

Grenier	Occupé ou hauteur minimale < 1,9 m
Structure du toit	Idéalement un toit avec une proportion de toiture plate suffisamment grande Charge par unité de surface admissible > 90 kg/m²
Jardin/espace extérieur	Non pertinent
Locaux au sous-sol	Espace disponible suffisant pour l'installation du réservoir d'accumulation et, le cas échéant, de la ou des unités intérieures, de la ou des pompes à chaleur
Distribution de chaleur	Distribution de chaleur existante à une température de départ maximale requise de 60 °C ; S'il n'existe pas de distribution de chaleur ou si la température de départ maximale requise est supérieure à 60 °C : rénovation nécessaire
Alimentation électrique	Alimentation électrique de 200 A à 400 V au total pour une pompe à chaleur d'une puissance de chauffage de 60 kW ; En cas d'alimentation électrique insuffisante : rénovation nécessaire ou fonctionnement bivalent avec une pompe à chaleur et un générateur de chaleur supplémentaire

La solution 4 utilise des pompes à chaleur standard ou spécifiques pour une installation split dans le but de réduire au minimum les émissions sonores à l'extérieur. L'unité extérieure de la pompe à chaleur split est installée sur le toit du bâtiment, ce qui devrait également être possible avec de faibles charges par unité de surface admissibles sur le toit. En fonction de l'espace disponible dans le bâtiment, l'unité intérieure peut être installée dans le grenier ou au sous-sol du bâtiment ; en cas d'utilisation d'installations split traditionnelles à réfrigérant, il est préférable d'installer l'unité intérieure aussi près que possible de l'unité extérieure. Si l'unité intérieure est installée dans le grenier, des systèmes split à réfrigérant courants peuvent être utilisés. Si, par contre, l'unité intérieure doit être installée au sous-sol du bâtiment faute d'espace insuffisant dans le grenier, des installations split à liaison hydraulique doivent être utilisés en raison de la grande distance qui en résulte entre les unités intérieure et extérieure.

Pour obtenir un fonctionnement extrêmement silencieux sans bruits d'écoulement gênants, des unités extérieures de grandes dimensions avec des ventilateurs à régime lent sont utilisées de manière avantageuse. Avec le dimensionnement correct des unités extérieures, des niveaux de puissance acoustique de l'unité extérieure inférieurs à 50 dB (A) peuvent être atteints, ce qui rend les mesures d'insonorisation supplémentaires superflues. Afin d'obtenir la hauteur totale la plus basse possible de l'unité extérieure, elle peut être conçue, par exemple, à titre de refroidisseur de table. La hauteur totale résultante de ces unités extérieures peut être inférieure à 1,3 m, ce qui peut être très important en termes de protection des monuments lors de l'installation sur un toit. En raison de la faible hauteur totale, une telle unité extérieure peut être dotée assez facilement d'une protection extérieure contre les regards indiscrets appropriée, qui est intégré dans l'aspect de la structure du bâtiment. Si l'unité extérieure d'une pompe à chaleur air-eau est dimensionnée, par exemple, avec une puissance de chauffage de 60 kW à une température ambiante de -7 °C d'après la procédure décrite ici, la surface de plancher requis résultant de l'unité extérieure est de 8 à 10 m² environ.

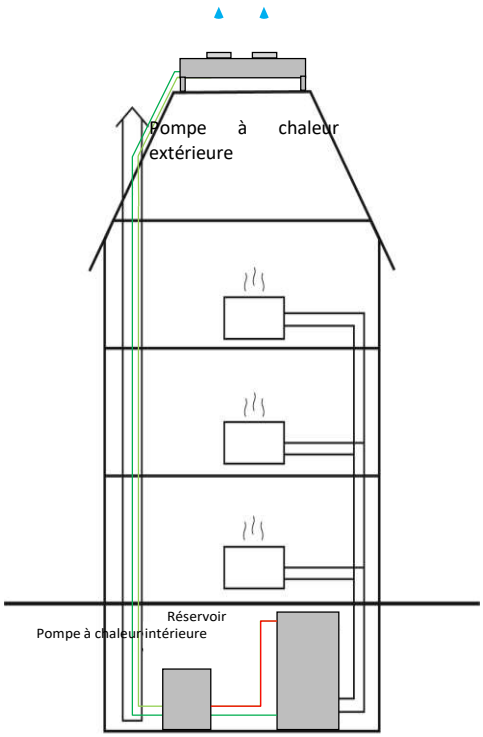


Schéma 45 : Solution 4 - Installation de pompes à chaleur split sur le toit (unité extérieure) et au sous-sol (unité intérieure).

Afin de compenser les éventuels temps de blocage de la pompe à chaleur par l'entreprise d'approvisionnement en énergie, le système de chauffage doit être doté de réservoirs d'accumulation correctement dimensionnés.

Compte tenu de la masse importante des réservoirs, les réservoirs d'accumulation sont installés de manière avantageuse au sous-sol du bâtiment.

La pose des conduites split entre les unités intérieure et extérieure de la pompe à chaleur et éventuellement aussi les conduites d'aller et de retour de l'unité interne de la pompe à chaleur (entre le réservoir et l'unité intérieure de la pompe à chaleur) peut facilement se faire à travers les cheminées existantes du bâtiment lors de la mise en œuvre d'un système de chauffage monovalent avec pompes à chaleur qui deviendra superflue à la suite de la rénovation du chauffage. Si la rénovation du chauffage nécessite la mise en place d'un système de chauffage bivalent avec des pompes à chaleur air-au et des générateurs de chaleur supplémentaires (chaudière au fioul ou au gaz), l'utilisation de cheminées existantes pour la pose des conduites de la pompe à chaleur peut s'avérer impossible. Dans ce cas, des solutions alternatives pour le câblage doivent être créées en fonction de la situation.

S'agissant des nuisances sonores de la pompe à chaleur, il est non seulement important que l'unité extérieure soit optimisée pour un fonctionnement extrêmement silencieux, mais également que l'unité intérieure soit dotée d'un découplage sonore parfait de la structure entre l'unité intérieure de la pompe à chaleur et la structure du bâtiment. Seul un découplage optimal du bruit transmis par la structure permet d'éviter avec efficacité la propagation du bruit à l'intérieur du bâtiment lorsque la pompe à chaleur fonctionne. De plus, des pompes à chaleur avec des boîtiers aussi insonorisés que possible doivent être utilisées afin d'éviter que le bruit transmis par l'air ne se propage sur les surfaces du boîtier des pompes à chaleur.

Le schéma 46 montre deux versions possibles de la solution 4 sur la base des bâtiments situés à Kruggasse 8, Zurich (voir chapitre 10.3) et à Müllerstrasse 34, Zurich (voir chapitre 10.2).

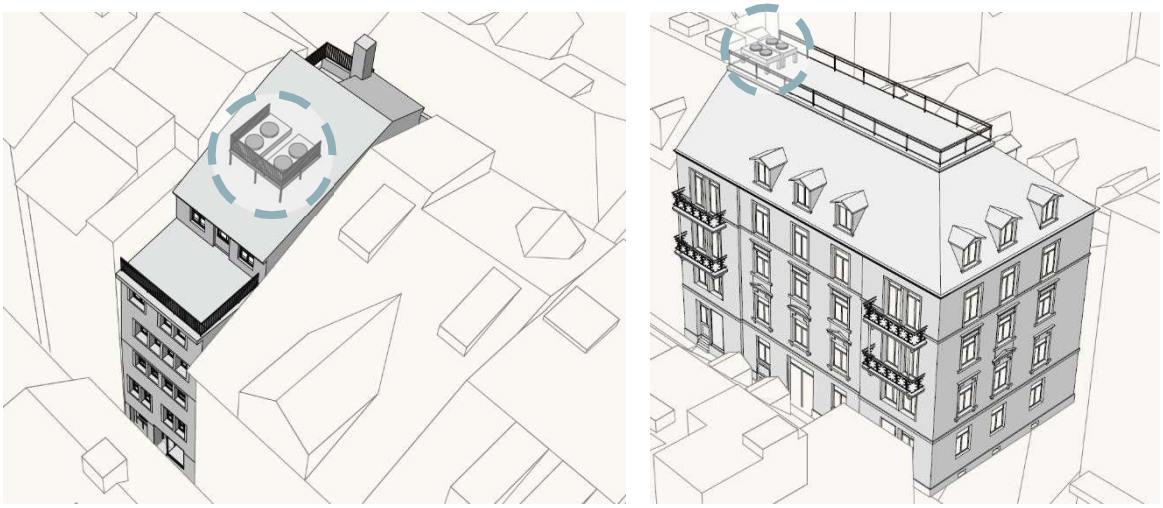


Schéma 46 : Solution 4 - visualisation de la solution 4 basée sur les bâtiments situés à Kruggasse 8, Zurich (à gauche) et à Müllerstrasse 34, Zurich (à droite).

8.3.5 Solution 5 - Installation de la pompe à chaleur sur le toit - version compacte

S'il n'est pas possible de mettre en œuvre la solution 4 avec l'utilisation de pompes à chaleur split faute d'espace suffisant pour l'installation de l'unité intérieure dans le bâtiment, la solution 5 décrite ci-dessous offre une alternative possible. La solution 5 utilise une ou plusieurs pompes à chaleur air-eau compactes installées sur le toit du bâtiment.

Tableau 7 : Caractéristiques obligatoires du bâtiment, solution 5.

Grenier	Occupé ou hauteur minimale < 1,9 m
Structure du toit	Idéalement un toit avec une proportion de toiture plate suffisamment grande Charge par unité de surface admissible > 500 kg/m² (sinon, des mesures appropriées sont nécessaires pour introduire le poids dans la structure du bâtiment)
Jardin/espace extérieur	Non pertinent
Locaux du sous-sol	Espace disponible suffisant pour l'installation du réservoir d'accumulation
Distribution de chaleur	Distribution de chaleur existante à une température de départ maximale requise de 60 °C ; S'il n'existe pas de distribution de chaleur ou si la température de départ maximale requise est supérieure à 60 °C : rénovation nécessaire
Alimentation électrique	Alimentation électrique de 200 A à 400 V au total pour une pompe à chaleur d'une puissance de chauffage de 60 kW ; En cas d'alimentation électrique insuffisante : rénovation nécessaire ou fonctionnement bivalent avec pompe à chaleur et générateur de chaleur supplémentaire

La solution 5 - Installation de la pompe à chaleur sur le toit permet l'utilisation de pompes à chaleur standard pour une installation extérieure en version compacte. Une ou plusieurs pompes à chaleur sont installées sur le toit du bâtiment. Cette solution a déjà été mise en œuvre avec succès dans un ancien bâtiment de la ville de Vienne (voir paragraphe 6.1.1). Dans le contexte de la protection des monuments historiques et des exigences strictes en matière d'émissions sonores des pompes à chaleur, la mise en œuvre de cette solution par rapport aux solutions 3 et 4 est considérée comme nettement plus cruciale. Par conséquent, cette solution ne doit être envisagée que si la mise en œuvre d'après les solutions 1 à 4 n'est pas possible.

Afin d'obtenir le fonctionnement le plus silencieux possible lors de l'utilisation de cette solution, des pompes à chaleur compactes optimisées en termes de niveau de puissance acoustique doivent être utilisées. Dans ce contexte, l'étude de marché réalisée montre que la plupart des pompes à chaleur compactes actuellement disponibles sur le marché ont des niveaux de puissance acoustique supérieurs à 55 dB (a). Dans la plupart des cas, cela signifie que des mesures supplémentaires sont nécessaires pour atteindre les niveaux sonores requis. Pour réduire les émissions sonores et à titre de protection extérieure contre les regards indiscrets, les pompes à chaleur peuvent être entourées de panneaux préfabriqués insonorisants, par exemple. En particulier, la hauteur des systèmes compacts, qui est nettement supérieure à celle des unités externes des installations compactes, en général supérieure à 1,6 m, devrait souvent rendre nécessaire un boîtier de protection extérieure contre les regards indiscrets.

S’agissant des nuisances sonores, en plus de l’utilisation de pompes à chaleur les plus silencieuses que possible, il est important que la pompe à chaleur installée à l’extérieur soit dotée d’un parfait découplage des bruits entre la pompe à chaleur et la structure du bâtiment. Seul un découplage optimal du bruit transmis par la structure permet d’éviter avec efficacité la propagation du bruit à l’intérieur du bâtiment lorsque la pompe à chaleur fonctionne.

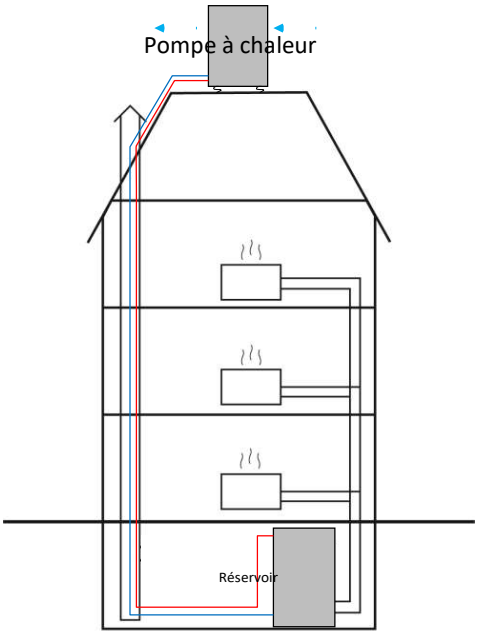


Schéma 47 : Solution 5 – Installation d'une pompe à chaleur compacte sur le toit.

Afin de compenser les éventuels temps de blocage de la pompe à chaleur par l'entreprise d'approvisionnement en énergie, le système de chauffage doit être doté d'un réservoir d'accumulation suffisamment dimensionné. Compte tenu de la masse importante des réservoirs, les réservoirs d'accumulation sont installés de manière avantageuse au sous-sol du bâtiment.

Lors de la mise en œuvre d'un système monovalent avec pompes à chaleur air-eau, les conduites d'arrivée et de retour de la pompe à chaleur installée à l'extérieur (entre le réservoir et la pompe à chaleur) peuvent simplement être posées à travers les cheminées existantes du bâtiment, qui ne sont plus nécessaires compte tenu de la rénovation du chauffage. Si la rénovation du chauffage nécessite la mise en place d'un système de chauffage bivalent avec des pompes à chaleur air-eau et des générateurs de chaleur supplémentaires, cela peut rendre impossible l'utilisation des cheminées existantes pour la pose des conduites de la pompe à chaleur. Dans ce cas, des solutions alternatives concernant le câblage doivent être créées en fonction de la situation.

Le schéma 48 montre une mise en œuvre possible de la solution 5 basée sur le bâtiment situé à Müllerstrasse 34, Zurich (cf. chapitre 10.2).

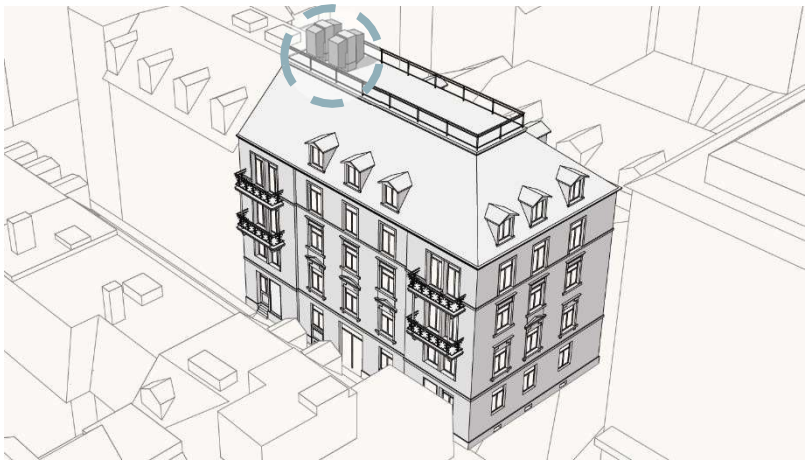


Schéma 48 : Solution 5 - visualisation de la solution 5 basée sur le bâtiment situé à Müllerstrasse 34, Zurich.

9 Recommandations en termes d'étude de projets

Sur la base des conclusions de l'étude de projets virtuels, une matrice des variantes détaillée pour vérifier l'adéquation d'un bâtiment donné pour utiliser des pompes à chaleur air-eau comme principal générateur de chaleur principal a été élaborée dans le cadre de cette étude. La matrice des variantes contient les caractéristiques importantes du bâtiment et montre, sur la base de diverses questions, si le bâtiment se prête à la rénovation du chauffage à l'aide d'une pompe à chaleur air-eau. En outre, la matrice des variantes peut être utilisée pour déterminer quelle solution doit être utilisée de manière avantageuse concernant l'intégration de la pompe à chaleur air-eau dans le bâtiment. À l'aide d'une liste de questions supplémentaires, les solutions en question peuvent être examinées en profondeur et des informations supplémentaires concernant l'étude de projets, par ex., il est possible de déterminer si l'utilisation d'installations standard ou une conception monovalente ou bivalente de la pompe à chaleur est judicieuse.

La matrice des variantes élaborée vise à aider les propriétaires et les entreprises chargées de l'étude à un stade précoce du projet préliminaire et ainsi à faciliter la planification des futurs systèmes de chauffage avec pompes à chaleur air-eau dans les zones urbaines.

9.1 Matrice des variantes pour le test d'adéquation et la recherche de solutions

La matrice des variantes prend en compte différentes caractéristiques du bâtiment, qui sont d'une importance capitale concernant l'adéquation du bâtiment pour utiliser des pompes à chaleur air-eau et s'agissant de la solution idéale pour l'installation des pompes à chaleur. Les caractéristiques importantes du bâtiment sont, par exemple, la structure du toit et du grenier, qui sont particulièrement pertinentes pour l'installation de pompes à chaleur. Le traitement de la matrice des variantes d'après le schéma 49 a lieu de l'intérieur vers l'extérieur d'après la procédure suivante.

Étape 1 - Détermination de la puissance de chauffage requise :

Dans un premier temps, la puissance de chauffage nécessaire du système de chauffage et de la pompe à chaleur est déterminée. En cas de remplacement du chauffage, la puissance de chauffage est déterminée de manière avantageuse en utilisant des données de consommation effective (fioul, gaz, électricité, etc.) et en utilisant des outils communs pour déterminer la puissance de chauffage nominale à la température de conception appropriée conformément au cahier technique SIA 2028 [4]. Lors de la détermination de la puissance thermique nominale requise, il faut tenir compte non seulement des besoins en chauffage du bâtiment, mais également de toute production d'eau chaude par la pompe à chaleur et des éventuels temps de blocage à respecter par l'entreprise d'approvisionnement en énergie.

Lors du traitement de la matrice des variantes, il est recommandé de vérifier à la fois une variante avec une conception monovalente de la pompe à chaleur et une variante avec une conception bivalente de la pompe à chaleur. La raison en est que, selon la conception de la puissance de la pompe à chaleur, différents résultats peuvent résulter en termes d'adéquation et de solution idéale. En fonction de ces résultats, après le traitement de la matrice des variantes, une décision peut être prise concernant la conception monovalente ou bivalente de la pompe à chaleur. La solution suivante peut être utilisée pour déterminer la puissance thermique nominale de la pompe à chaleur.

Conception monovalente : la puissance de chauffage nominale de la pompe à chaleur à la température de conception correspond à 100 % de la puissance de chauffage requise du bâtiment pour le chauffage et l'eau chaude.

Conception bivalente : la puissance thermique nominale de la pompe à chaleur à la température de calcul correspond entre 50 à 65 % de la puissance thermique requise du bâtiment pour le chauffage et l'eau chaude

Schéma 49 : Matrice des variantes

Tableau 8 : Abréviations de la matrice des variantes

WP	Pompe à chaleur
PSP	Réservoir d'accumulation
LW-WP	Pompe à chaleur air-eau
H	Hauteur de la pièce
L1	Solution 1, installation de la pompe à chaleur à l'extérieur, passer à la liste de questions L1
L2	Solution 2, installation de la pompe à chaleur au sous-sol/rez-de-chaussée, passez à la liste de questions L2
L3	Solution 3, installation de la pompe à chaleur dans les combles, passer à la liste de questions L3
L4	Solution 4, installation de la pompe à chaleur sur un toit split, passer à la liste de questions L4
L5	Solution 5, installation de la pompe à chaleur sur un toit compact, passer à la liste de questions L5
1, 2, 3, 4, 5	Questions sur le test d'adéquation et recherche de solutions, étape 2

Étape 2 - Test d'adéquation et recherche d'une solution avec une matrice des variantes :
Dans un second temps, les questions énumérées dans la matrice des variantes (schéma 49) obtiennent une réponse, le traitement étant effectué de l'intérieur vers l'extérieur. Vous pouvez procéder comme suit.

1 L'estimation de l'espace nécessaire aux pompes à chaleur compactes pour une installation intérieure au sous-sol peut être faite en utilisant la courbe a) du diagramme du schéma 50.

L'estimation de l'espace nécessaire à l'installation du réservoir d'accumulation peut être faite en utilisant la courbe f) du diagramme d'après le schéma 51.

2 Une découpe de façade doit être créée pour le conduit de ventilation pour l'alimentation en air et l'évacuation de l'air. La section transversale des conduits de ventilation requis peut être estimée à l'aide de la courbe h) du diagramme d'après le schéma 51.

Si les découpes de façade sont en dessous du niveau du terrain, il doit également y avoir suffisamment d'espace pour créer les puits de lumière. La section transversale des conduits de ventilation requis peut être estimée à l'aide de la courbe g) du diagramme d'après le schéma 51.

3 L'espace requis pour la pompe à chaleur compacte installée à l'extérieur dans le jardin peut être déterminé à l'aide de la courbe b) du schéma 50.

L'espace requis pour l'unité extérieure de la pompe à chaleur en version split qui est installée à l'extérieur dans le jardin peut être déterminé à l'aide de la courbe c2) du schéma 50. Lors de l'utilisation de pompes à chaleur split, l'unité interne de la pompe à chaleur doit également être installée au sous-sol ou dans le local technique du bâtiment. L'espace requis pour l'unité interne de la pompe à chaleur split peut être déterminé à l'aide de la courbe c1) du schéma 50.

La pompe à chaleur installée à l'extérieur dans le jardin doit garder une distance minimale par rapport au récepteur de bruit suivant afin de pouvoir satisfaire aux exigences de la preuve de la protection contre le bruit. La distance d'installation minimale requise entre la pompe à chaleur et le récepteur de bruit le plus proche peut être déterminée en fonction du niveau de sensibilité du lieu d'installation à l'aide des diagrammes du schéma52 (ES I), schéma 53 (ES II), schéma 54 (ES III) et schéma 55 (ES IV). En cas d'appareil sur pieds et en fonctionnement à un niveau (pas de mise en cascade des pompes à chaleur, un compresseur), les distances minimales d'après les diagrammes peuvent être prises en compte. Lors de l'installation de la pompe à chaleur dans un bâtiment ou à l'angle d'une façade et en fonctionnement à plusieurs niveaux (mise en cascade des pompes à chaleur ou plusieurs compresseurs), les valeurs des distances maximales d'après les diagrammes doivent être respectées.

4 Une installation de pompes à chaleur dans le grenier nécessite que celui-ci soit disponible pour l'installation de pompes à chaleur et que la hauteur du local soit de 1,9 m au minimum.

4.1 Installation au sous-sol impossible

L'estimation de l'espace nécessaire aux pompes à chaleur compactes pour une installation intérieure au sous-sol peut être faite en utilisant la courbe a) du diagramme d'après le schéma 50.

L'estimation de l'espace nécessaire à l'installation du réservoir d'accumulation peut être faite à l'aide de la courbe f) du diagramme d'après le schéma 51.

Vérification de la statique absolument nécessaire : la statique peut-elle être garantie par des mesures appropriées ?

4.2 Installation du réservoir d'accumulation au sous-sol possible

L'estimation de l'espace nécessaire aux pompes à chaleur compactes pour une installation intérieure au sous-sol peut être faite en utilisant la courbe a) du diagramme conformément au schéma 50.

Vérification de la statique absolument nécessaire : la statique peut-elle être garantie par des mesures appropriées ?

5 Une installation de pompes à chaleur sur le toit du bâtiment nécessite idéalement une proportion suffisamment importante de toiture plate. Si le bâtiment ne dispose pas d'un toit plat suffisamment grand, il est déconseillé d'installer des pompes à chaleur sur le toit.

5.1 Installation de la pompe à chaleur sur une partie non visible du toit plat

Si la proportion de la toiture plate n'est pas visible, des pompes à chaleur compactes peuvent être utilisées et installées sur le toit.
L'estimation de l'espace nécessaire aux pompes à chaleur compactes pour une installation extérieure sur le toit peut être faite à l'aide de la courbe b) du diagramme conformément au schéma 50.

5.2 Installation de la pompe à chaleur sur une partie non visible du toit plat

Si la partie de toit plat est visible, des unités extérieures plates de pompes à chaleur en version split sont installées de manière avantageuse sur la partie de toit plat.
L'espace nécessaire à l'unité extérieure de la pompe à chaleur installée sur le toit en version split peut être déterminé à l'aide de la courbe c2) du schéma 50. Lors de l'utilisation de pompes à chaleur en version split, l'unité interne de la pompe à chaleur doit également être installée au sous-sol ou dans le local technique du bâtiment. L'espace nécessaire à l'unité interne de la pompe à chaleur split peut être déterminé à l'aide de la courbe c1) du schéma 50.

Remarque : Toutes les valeurs indiquées dans les diagrammes pour l'espace requis en fonction de la puissance thermique nominale de la pompe à chaleur sont des valeurs linéarisées d'après les études de projets types. Les valeurs données servent d'estimation approximative des besoins en espace et doivent être vérifiées pour la conception efficace du système avant toute mise en œuvre du projet.

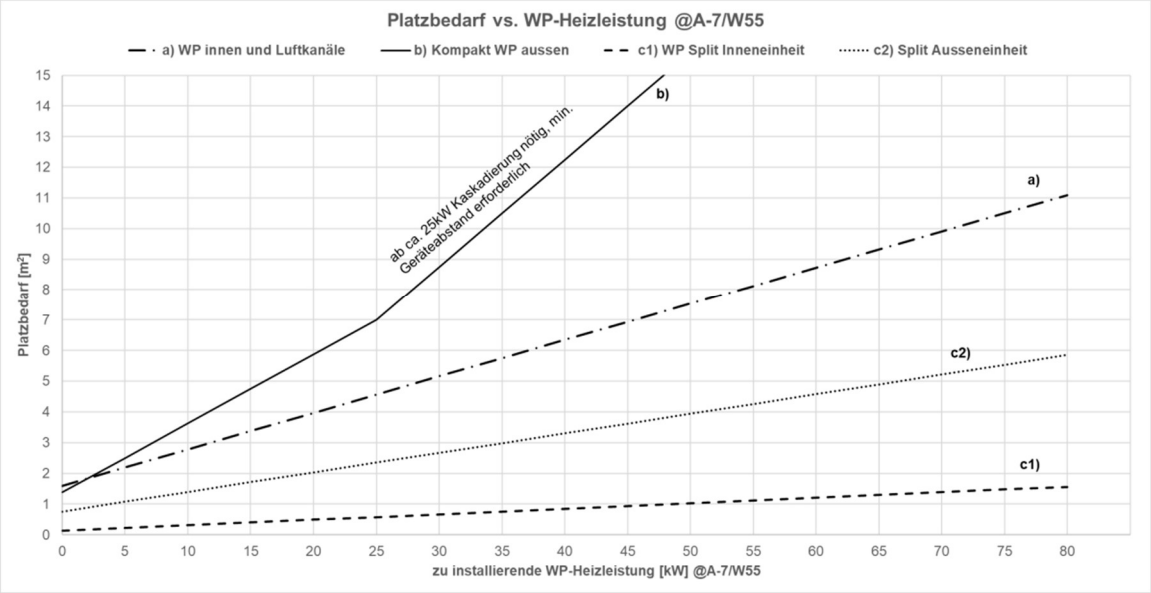


Schéma 50 : Espace nécessaire aux différentes conceptions de pompe à chaleur en fonction de la puissance nominale de chauffage @ A-7/W55.

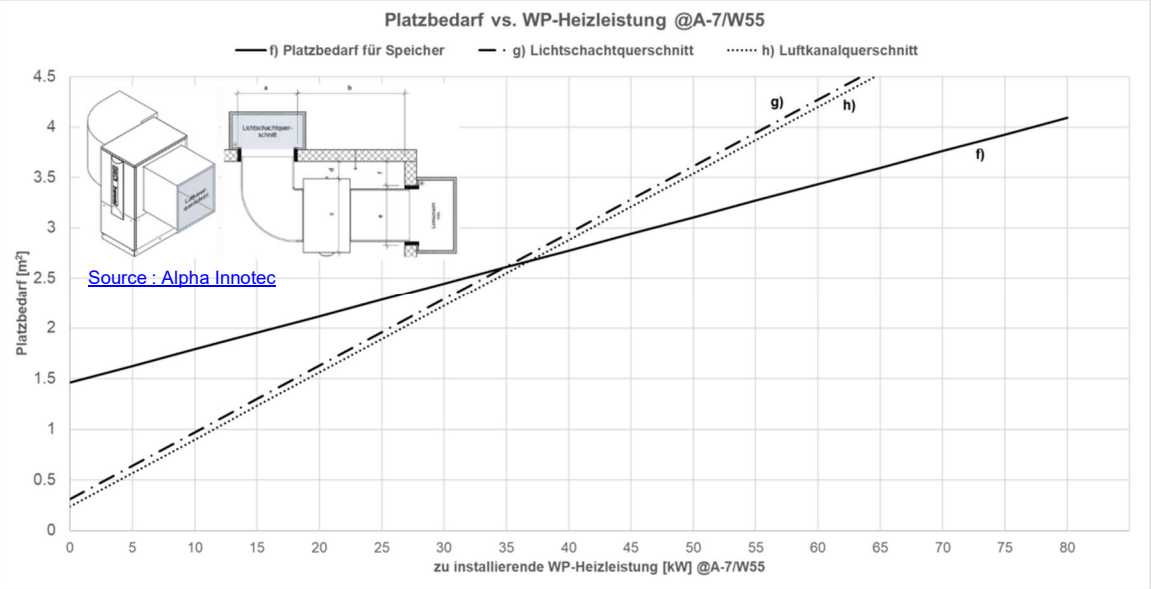


Schéma 51 : Espace nécessaire au réservoir d'accumulation, sections transversales des puits de lumière et sections transversales des conduits de ventilation en fonction de la puissance de chauffage nominale @ A-7/W55.

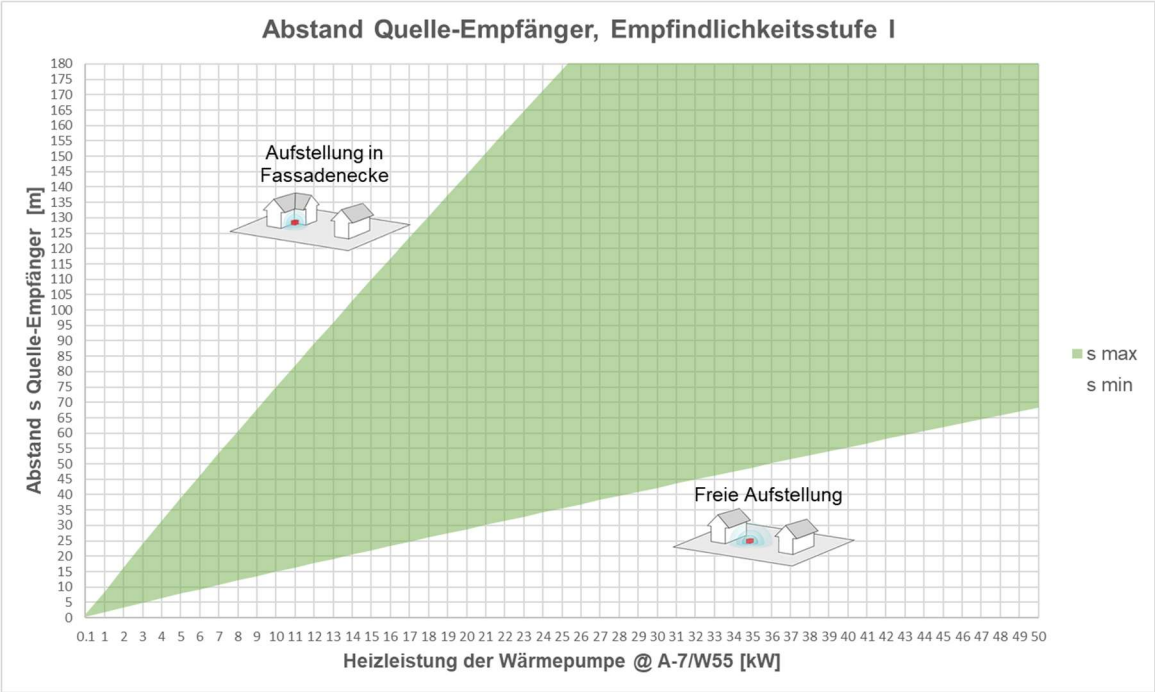


Schéma 52 : Niveau de sensibilité I - distance requise entre la source/le récepteur en fonction de la puissance de chauffage nominale @ A-7/W55.

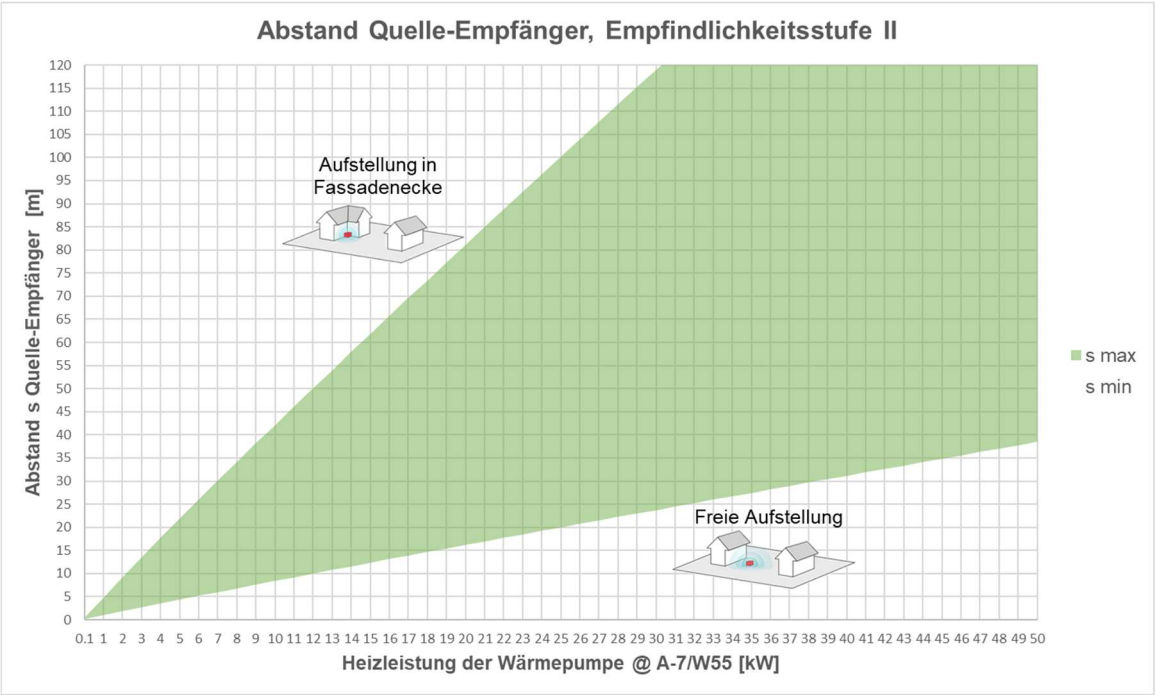


Schéma 52 : Niveau de sensibilité II - distance requise entre la source/le récepteur en fonction de la puissance de chauffage nominale @ A-7/W55.

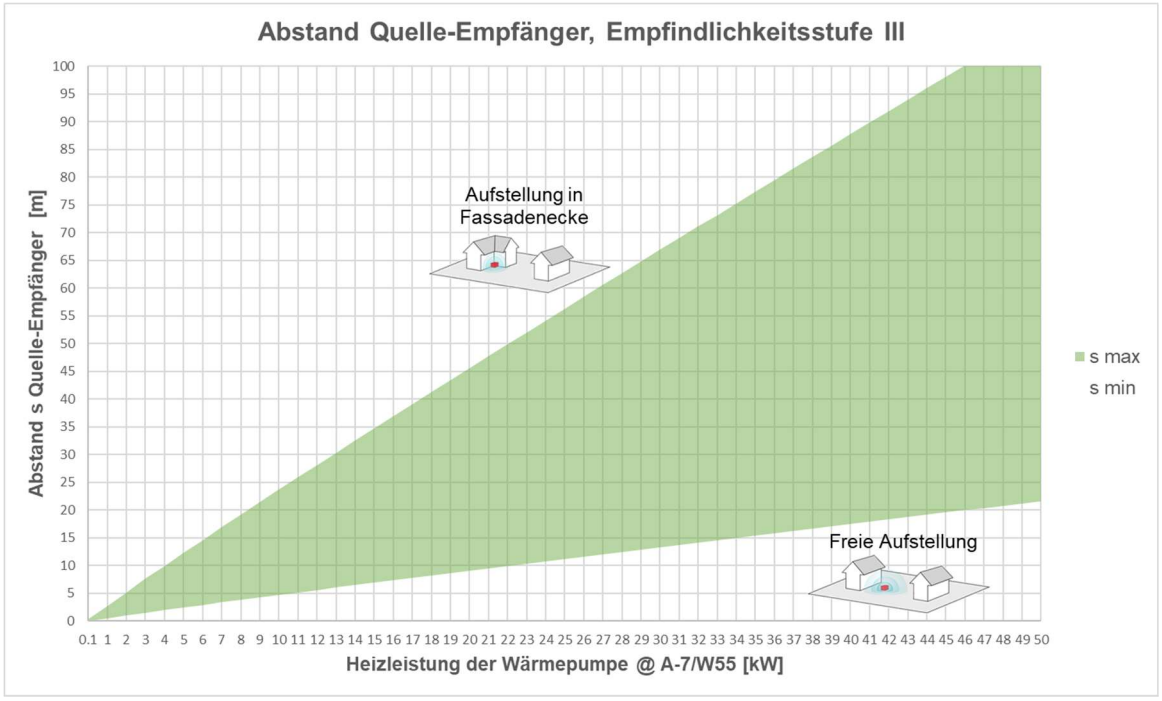


Schéma 54 : Niveau de sensibilité III - distance requise entre la source/le récepteur en fonction de la puissance de chauffage nominale @ A-7/W55.

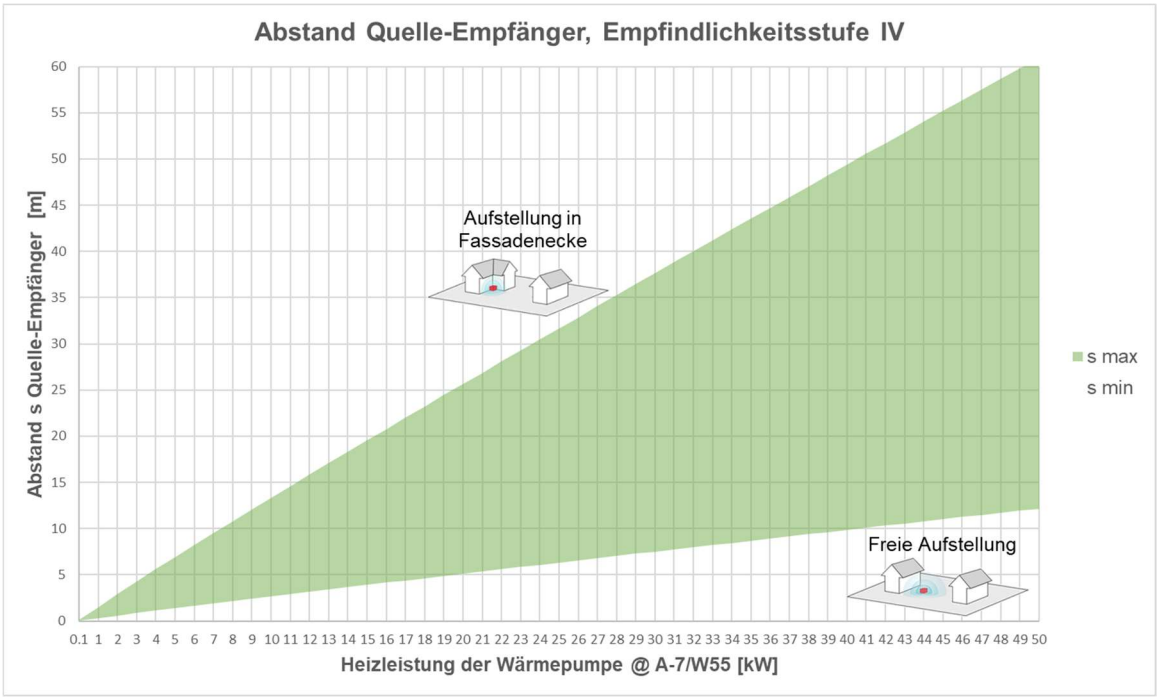


Schéma 55 : Niveau de sensibilité IV - distance requise entre la source/le récepteur en fonction de la puissance de chauffage nominale @ A-7/W55.

Si toutes les questions de la matrice des variantes obtiennent une réponse conformément à la procédure ci-dessus, la solution la plus appropriée quant à l'intégration de la pompe à chaleur pour le bâtiment considéré peut être déterminée de cette manière. Une distinction est faite entre les solutions 1 à 5 mises au point conformément au chapitre 8 « Solutions déduites et exigences en matière de pompes à chaleur ».

9.2 Liste de questions supplémentaires pour l'étude de projets

Si une solution appropriée pour un bâtiment donné a été déterminée à l'aide de la matrice des variantes, de nombreuses questions supplémentaires doivent être vérifiées et clarifiées dans le cadre de l'étude de projets. En plus des questions générales, des questions spécifiques doivent également être examinées en fonction de la solution souhaitée ou prévue.

9.2.1 Questions générales

Les questions générales auxquelles il faut répondre dans le cadre de l'étude de projets sont :

- L'alimentation électrique de la pompe à chaleur peut-elle être garantie ?

  La consommation électrique de la ou des pompes à chaleur peut être déduite des fiches techniques du fabricant ou déterminée approximativement pour une première estimation. Une détermination approximative de la consommation électrique maximale des pompes à chaleur peut être effectuée avec :

  Pel = puissance de chauffage nominale @ A-7/W55/coefficient de performance (COP Solution 5 - Installation de la pompe à chaleur sur le toit) (valeur supposée du COP = 2)

  Si l'alimentation électrique de la pompe à chaleur n'est pas possible avec la ligne d'alimentation électrique existante ou la protection par fusibles principale existante de l'alimentation électrique, il faut vérifier si la puissance connectée ou la protection par fusibles principale de l'alimentation électrique peut être augmentée, ou si l'alimentation électrique doit être renforcée ou remplacée. Ces clarifications sont effectuées de manière avantageuse en coopération avec l'entreprise d'approvisionnement en énergie locale.

  Si l'alimentation électrique doit être renforcée ou remise à neuf, cela peut entraîner des travaux onéreux. Dans ce cas, l'adaptation du mode de fonctionnement des pompes à chaleur à un mode de fonctionnement bivalent peut être utile.

- Le câblage (câbles électriques/conduites d'eau de chauffage) est-il possible, peut-on effectuer des travaux d et/ou les conduites requises peuvent-elles être acheminées vers et depuis le toit ?

  Si les pompes à chaleur sont installées sur le toit ou dans le grenier du bâtiment, les conduites (câbles électriques/conduites d'eau de chauffage) peuvent être acheminées dans des cheminées existantes qui ne seront plus nécessaires.

- La preuve de la protection contre le bruit peut-elle Solution 5 - Installation de la pompe à chaleur sur le toit avec la variante d'installation prévue ?

  Les valeurs acoustiques déterminantes de la ou des pompes à chaleur se trouvent dans les fiches techniques du fabricant.

9.2.2 Liste des questions pour la solution 1

- Les questions suivantes sont pertinentes pour l'étude de projets d'après la solution 1, outre les questions générales :
- La conformité à l'affectation de la zone est-elle garantie ?
- Les distances minimales par rapport aux bornes de la propriété peuvent-elles être respectées lors de l'installation de la pompe à chaleur ?
- Les pompes à chaleur peuvent-elles être installées de manière à éviter les courts-circuits

thermiques dans le courant atmosphérique ?
- Les conduites d'eau de chauffage à l'extérieur Solution 5 - Installation de la pompe à chaleur sur le toit entre les pompes à chaleur et le bâtiment peuvent-elles être posées avec un effort raisonnable ?
- Les éventuelles difficultés d'utilisation d'un mode de fonctionnement bivalent au lieu d'un mode de fonctionnement monovalent peuvent-elles être atténuées ?

9.2.3 Liste des questions pour la solution 2

- Les questions suivantes sont pertinentes pour l'étude de projets d'après la solution 2, outre les questions générales :
- La conformité à l'affectation de la zone est-elle garantie ?
- Les découpes de façade pour le conduit de ventilation peuvent-elles être créées avec les sections transversales requises sans avoir un impact négatif sur la statique du bâtiment, ou des mesures statiques sont-elles nécessaires en raison des découpes de façade ?
- Les pompes à chaleur peuvent-elles être installées ou les découpes de façade pour le conduit de ventilation peuvent-elles être positionnées de manière à éviter les courts-circuits thermiques dans le courant atmosphérique ?
- Les éventuelles difficultés d'utilisation d'un mode de fonctionnement bivalent au lieu d'un mode de fonctionnement monovalent peuvent-elles être atténuées ?

9.2.4 Liste des questions pour la solution 3

- Les questions suivantes sont pertinentes pour l'étude de projets d'après la solution 3, outre les questions générales :
- La conformité à l'affectation de la zone est-elle garantie ?
- La statique du bâtiment permet-elle l'installation de pompes à chaleur sur le toit ou faut-il envisager des mesures statiques sur la structure du bâtiment ?
  Ces clarifications doivent être effectuées en collaboration avec un ingénieur du génie civil.
- Les pompes à chaleur peuvent-elles être installées de manière à garantir un découplage suffisant du bruit lié à la structure entre les pompes à chaleur et la structure du bâtiment ?
  Ces clarifications sont mieux effectuées en collaboration avec un acousticien.
- Les pompes à chaleur peuvent-elles être installées ou les découpes de toit pour le conduit de ventilation peuvent-elles être positionnées de manière à éviter les courts-circuits thermiques dans le courant atmosphérique ?
- Les éventuelles difficultés lors de l'utilisation d'un mode de fonctionnement bivalent au lieu d'un mode de fonctionnement monovalent peuvent-elles être atténuées ?

9.2.5 Liste des questions pour les solutions 4 et 5

Les questions suivantes sont pertinentes pour l'étude de projets d'après les solutions 4 et 5, outre les questions générales :

- La conformité à l’affectation de la zone est-elle garantie ?
- La statique du bâtiment permet-elle d’installer des pompes à chaleur sur le toit ou faut-il prendre en compte des mesures statiques sur la structure du bâtiment ? Ces clarifications doivent obligatoirement être effectuées en collaboration avec un ingénieur en génie civil.
- Les pompes à chaleur peuvent-elles être installées de manière à garantir un découplage suffisant du bruit lié à la structure entre les pompes à chaleur et la structure du bâtiment ? Ces clarifications sont mieux effectuées en collaboration avec un acousticien.
- Les éventuelles difficultés lors de l’utilisation d’un mode de fonctionnement bivalent au lieu d’un mode de fonctionnement monovalent peuvent-elles être atténuées ?

10 Études de projets virtuels

Dans le cadre de l'étude, sur la base des solutions élaborées, des études de projets virtuels ont été réalisées pour trois immeubles du portefeuille de Liegenschaften Stadt Zürich (LSZ). Les études de projets virtuels ont été réalisées en étroite collaboration avec la conservation des monuments historiques et ont pris en compte des bâtiments bénéficiant de différents statuts de protection. Les bâtiments suivants ont été pris en considération :

- rue Hofwiesenstrasse 126 : zone d'habitation
- rue Müllerstrasse 34 : zone de conservation de quartiers
- rue Kruggasse 8 : zone du centre, classée

Les paragraphes suivants font un récapitulatif détaillé des constatations et des résultats de ces études de projets virtuels.

Tous les coûts présentés dans cette étude sont valables en tenant compte des conditions générales de la ville de Zurich. Dans ce contexte, il convient de noter en particulier les coûts des honoraires, les frais liés aux autorisations, les exigences en matière d'urbanisme, les exigences en matière de protection contre le bruit, les prix de l'énergie pour la ville de Zurich et les typologies des bâtiments.

10.1 Rue Hofwiesenstrasse 126

10.1.1 Situation

Un résumé des caractéristiques les plus importantes du bâtiment situé à Hofwiesenstrasse 126 est présenté au chapitre 7.1. Les caractéristiques pertinentes pour l'étude de projets du système de pompe à chaleur sont expliquées en détail ci-dessous.

Schéma 56 : Vues de la rue Hofwiesenstrasse 126, Zurich

10.1.1.1 Zonage

Le zonage et le niveau de sensibilité du bâtiment situé à Hofwiesenstrasse 126 sont les suivants :

- Zone : W3 - zone d'habitation de trois étages
- Niveau de sensibilité : III

Le bâtiment n'est donc soumis à aucune exigence particulière en matière de protection des monuments ou à des exigences accrues en matière d'émissions sonores.

10.1.1.2 Conditions spatiales

Le bâtiment situé à Hofwiesenstrasse 126 dispose d'un terrain avec un jardin, ce qui permettrait en principe d'installer des pompes à chaleur air-eau à l'extérieur (solution 1). L'enjeu dans ce contexte est le respect des valeurs limites d'émissions sonores tout en respectant les distances minimales applicables aux bornes de la propriété lors de l'installation des pompes à chaleur.

Dans les locaux du sous-sol du bâtiment situé à Hofwiesenstrasse, il y a actuellement un grand nombre de compartiments de cave, qui sont attribués aux divers résidents, ainsi que des buanderies et locaux de séchage. En outre, les locaux au sous-sol abritent le chauffage central au fioul et un grand compartiment de réservoir (réservoir de fioul de 16 000 l), qui était à l'origine utilisé comme trémie à charbon. Dans le cadre de la rénovation de l'ensemble du système de chauffage, le compartiment du réservoir pourrait en principe être utilisé pour une installation intérieure d'une pompe à chaleur air-eau (solution 2). La difficulté ici est que les espaces habitables sont disposés au-dessus du compartiment du réservoir, ce qui complique la conception des ouvertures d'entrée et de sortie de l'air dans les parois extérieures du bâtiment en raison des émissions sonores qui en résultent.

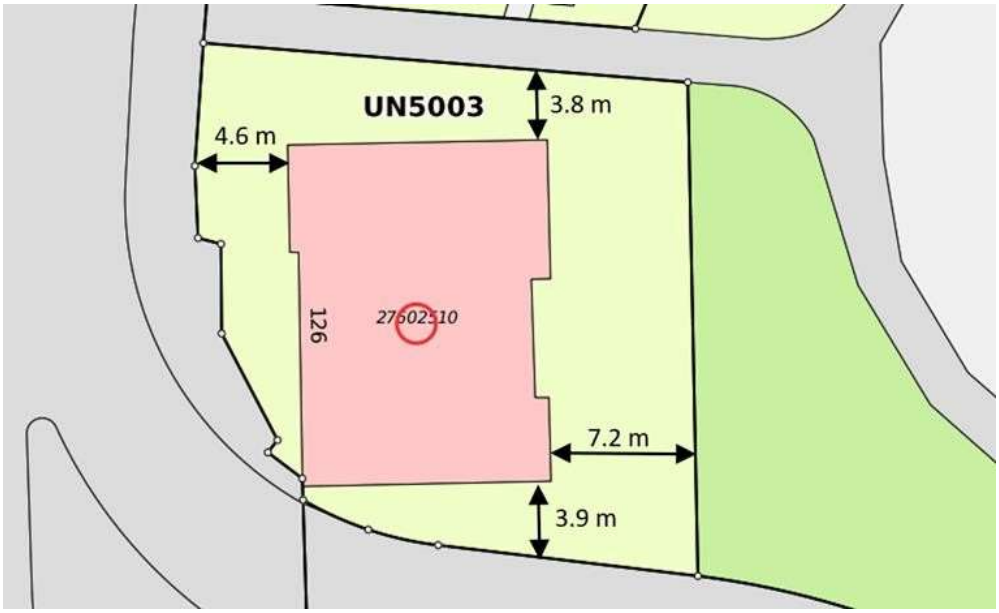


Schéma 57 : Vue cartographique de la rue Hofwiesenstrasse 126 avec les bornes de la propriété (source : GIS-Broser ZH [16])

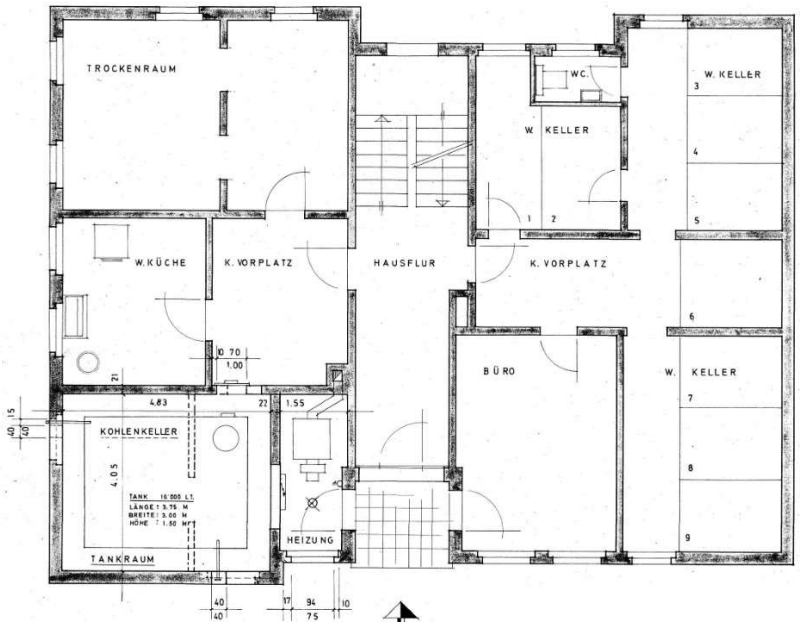


Schéma 58 : Plan du sous-sol de la rue Hofwiesenstrasse 126. (Source : Service d'inspection des constructions en hauteur de Zurich (devenu Office des bâtiments - AHB)

Le bâtiment situé à Hofwiesenstrasse 126 dispose de combles accessibles et inoccupés qui peuvent être utilisés par les résidents à titre de chape et comme local de séchage du linge. À condition que les résidents acceptent des déperditions, il serait possible d'installer des pompes à chaleur dans le grenier (solution 3). Le principal défi est la hauteur totale parfois très limitée du grenier en raison de la structure du toit à pignon, ce qui peut compliquer considérablement l'installation d'une pompe à chaleur intérieure traditionnelle.

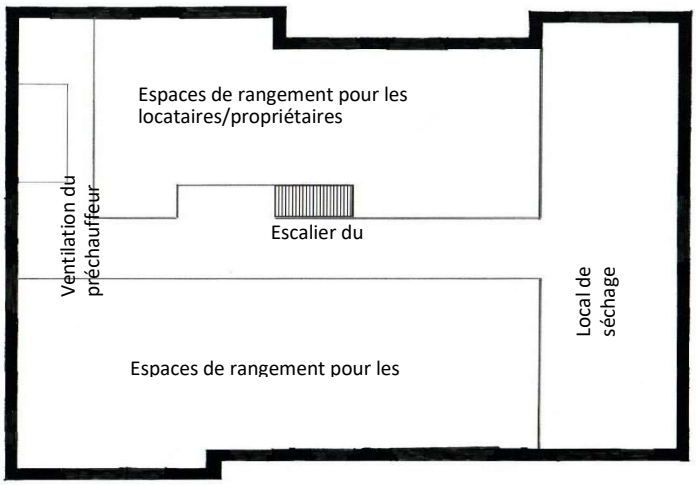


Schéma 59 : Plan du grenier de la rue Hofwiesenstrasse 126.

Le bâtiment a un toit à pignon avec une légère inclinaison sans proportion de toiture plate. Il est difficile d'installer des pompes à chaleur sur le toit.

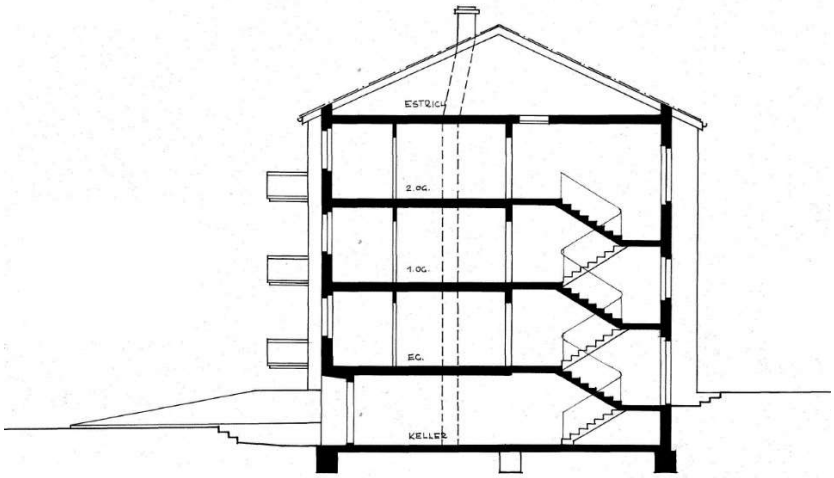


Schéma 60 : Coupe transversale du bâtiment situé à Hofwiesenstrasse 126. (Source : Service d'inspection des constructions en hauteur de Zurich (devenu Office des bâtiments -AHB)

10.1.1.3 Puissance de chauffage requise et courbe de chauffage

Le bâtiment dispose actuellement d'un chauffage central au fioul pour fournir la chaleur thermique. La chaleur est distribuée par des radiateurs à une température de départ maximale requise de 60 °C à une température ambiante de - 10 °C (voir schéma 61). Le bâtiment dispose également d'une ventilation, ce qui nécessite le préchauffage de l'air frais via le système de chauffage. L'eau chaude est actuellement produite à l'aide de chaudières électriques décentralisées. Il est prévu de centraliser la production d'eau chaude dans le cadre d'une rénovation complète du bâtiment et de le doter d'une chaudière avec une pompe à chaleur. Le tableau suivant montre les besoins énergétiques annuels actuels pour le chauffage et l'eau chaude.

Tableau 9 : Besoin en énergie de chauffage dans la rue Hofwiesenstrasse 126, état actuel (valeurs mesurées)

Poste	Besoins énergétiques annuels
Chauffage	98 500 kWh/a
Eau chaude	26 600 kWh/a (25 personnes)
Total chauffage et pompe à chaleur eau-eau	125 000 kWh/a

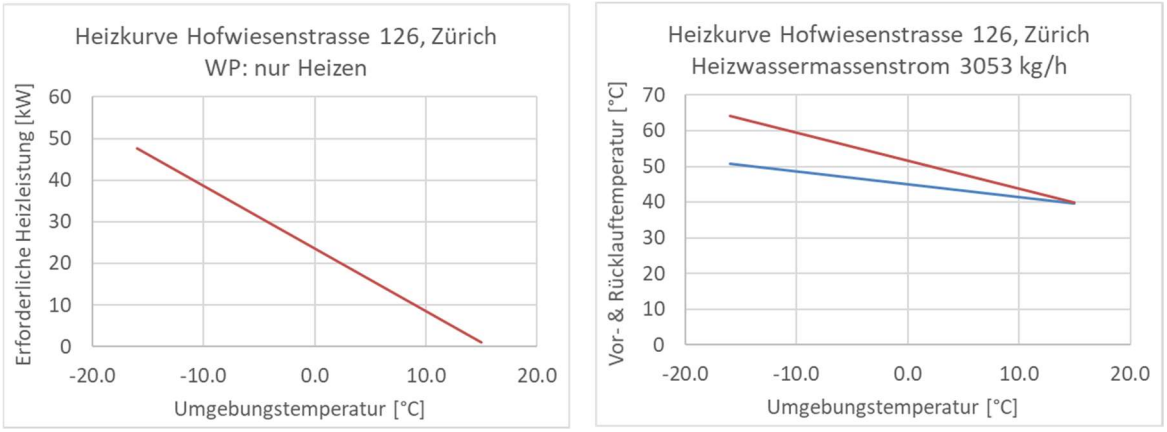


Schéma 61 : Puissance de chauffage et températures de départ/retour requises, état actuel (mesure)

Sur la base de la rénovation prévue et des valeurs d'isolation améliorées qui en résultent, l'expérience montre que la puissance de chauffage requise du bâtiment sera inférieure de 30 %, de sorte à pouvoir utiliser un débit massique de l'eau de chauffage inférieur de 2020 kg/h (voir schéma 62). Il en résulte les besoins annuels d'énergie thermique indiqués au tableau 10.

Tableau 10 : Demande d'énergie de chauffage dans la rue Hofwiesenstrasse 126, après rénovation complète (hypothèses)

Poste	Besoins énergétiques annuels
Chauffage	65 000 kWh/a
Eau chaude	26 600 kWh/a (25 personnes)
Total chauffage et pompe à chaleur eau-eau	91 600 kWh/a

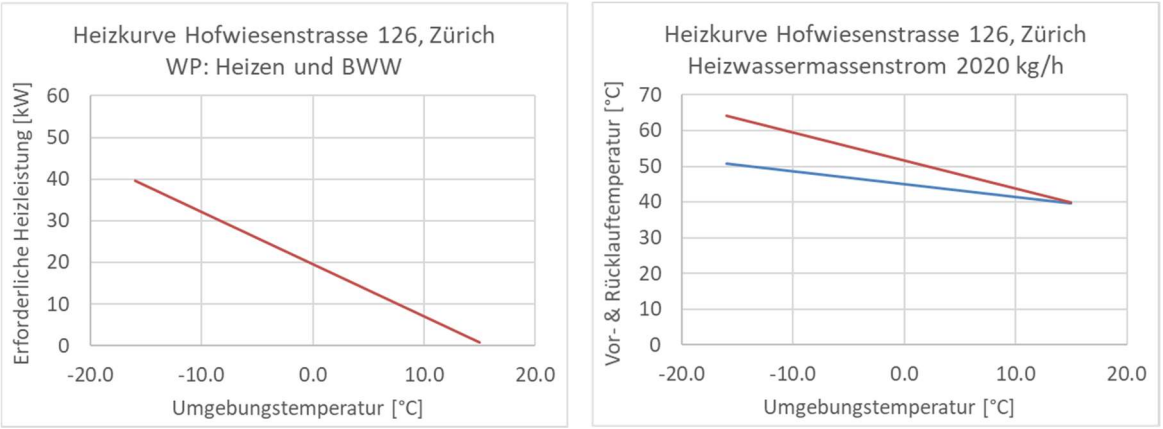


Schéma 62 : Puissance de chauffage et températures de départ/retour requises, état après rénovation complète (hypothèse)

Sur la base de ces conclusions, une comparaison des concepts de fonctionnement possibles a été faite (voir le tableau 11). Afin de pouvoir mettre en œuvre la production thermique en utilisant un concept de pompe à chaleur monovalente au cours de la rénovation complète prévue, deux pompes à chaleur sont nécessaires pour ce bien immobilier, chacune avec une puissance de chauffage totale minimale de 28 kW @ A-8/W55. (Les temps de blocage ne sont pas pris en compte : le modèle tarifaire correspondant doit être déterminé avec le fournisseur d'énergie). Étant donné que la puissance de chauffage requise est trop élevée avec les valeurs d'isolation actuelles, le système de pompe à chaleur devrait être soutenu par une chaudière au fioul jusqu'à la rénovation complète.

Tableau 11 : Dimensionnement de la puissance de chauffage de la pompe à chaleur air-eau, rue Hofwiesenstrasse 126

Puissance de chauffage de la pompe à chaleur @ A-8/W55	Part de la puissance de la pompe à chaleur à la puissance de crête @ A-8 [%]		Puissance de crête de la chaudière au fioul [kW]		Part de fioul dans l'énergie de chauffage [%]		Part de l'énergie de chauffage non renouvelable (Électricité : gestion mixte de la ville de Zurich) [%]		Consommation d'énergie maximum approximative de la pompe à chaleur [A]	
Avant/après rénovation complète	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
28 kW (2 pompes à chaleur)	79	***100***	7,6	***0***	1	***0***	3	***2***	***39***	
21 kW (2 pompes à chaleur)	59	75	14,6	7	5	1	6	3	28	
14 kW (1pompe à chaleur)	39	50	21,6	14	14	6	14	8	17	

Fonctionnement monovalent après la rénovation complète

Le système de pompe à chaleur optimal peut être défini avec ces contraintes :

- Puissance de chauffage requise @ A-8/W55 : 28 kW
- Température de départ requise : > 60 °C
- Efficacité : coefficient de performance (COP) idéal @ A-7/W55 > 1,8
- Puissance acoustique : < 60 dB (A) (idéalement < 55 dB (A))
- Mode de fonctionnement : bivalent parallèle avant la rénovation complète, monovalent après la rénovation complète

De plus, la chaudière au fioul, qui fonctionne avant la rénovation complète, doit avoir les spécifications suivantes :

- Puissance de chauffage requise @ A-8/W55 : 10,5 kW
- Chaudière à condensation pour toutes les qualités de fioul
- Séparateur hydraulique intégré

10.1.1.4 Raccordement électrique

Le bâtiment dispose d'une alimentation électrique avec une protection par fusibles de 63 A à 400 V - triphasée. Pour le fonctionnement d'une pompe à chaleur, selon le mode de fonctionnement et la conception de la pompe à chaleur, il peut être nécessaire de rénover ou d'agrandir l'alimentation électrique (voir les annexes 2 et 3). Des coûts supplémentaires doivent être acceptés, car le panneau existant est vétuste et, surtout, contient de l'amiante. Celui-ci devrait être complètement remplacé en cas d'intervention. Étant donné que le Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz) garantit une alimentation jusqu'à 100 A et que le bâtiment a plus de 60 ans, un remplacement en raison de la vétusté pourrait être réclamé. La contribution unique au coût du réseau (seule la différence par rapport à la consommation électrique supplémentaire) serait à la charge du propriétaire, de même que les travaux sur un terrain privé.

10.1.1.5 Solutions appropriées en matière d'étude de projets

La matrice des variantes (voir schéma 63) permet de déterminer toutes les solutions possibles, à savoir :

- Solution 1 - Installation dans le jardin
- Solution 2 - Installation au sous-sol
- Solution 3 - Installation dans le grenier

De plus, le schéma 64 montre le sommaire de ces solutions.

Schéma 63 : Matrice des variantes, rue Hofwiesenstrasse 126

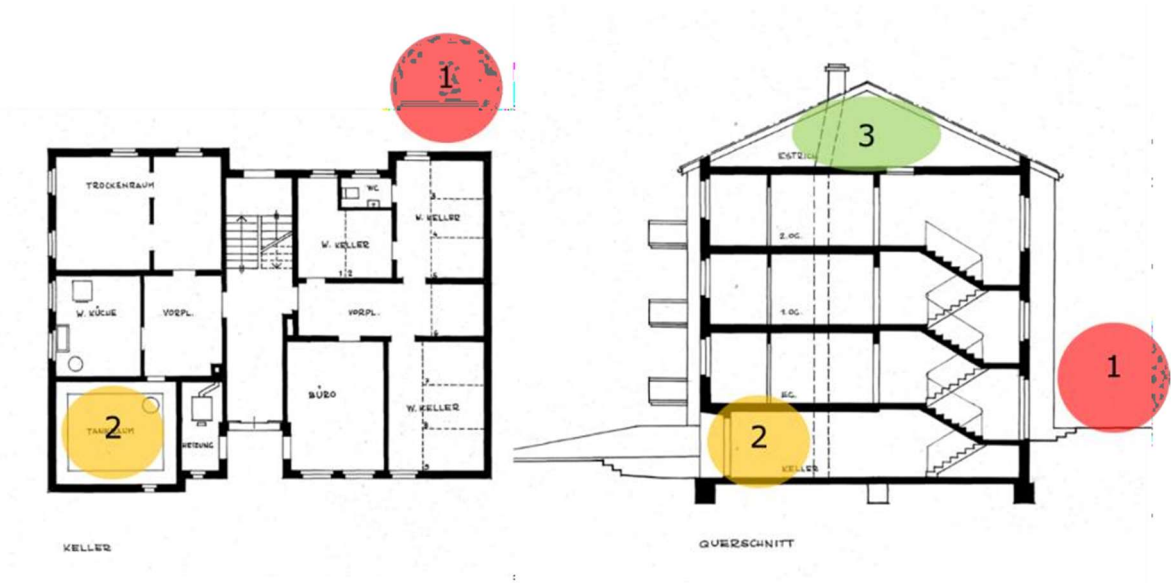


Schéma 64 : Sommaire des solutions possibles, rue Hofwiesenstrasse 126

10.1.2 Étude de projets, solution 1 – Installation dans le jardin – Mode monovalent après la rénovation

10.1.2.1 Mode de fonctionnement et dimensionnement de la puissance de chauffage de la pompe à chaleur

Il est prévu de centraliser la production d'eau chaude dans le cadre d'une rénovation complète du bâtiment, mais ceci séparément via des chaudières avec une pompe à chaleur. La consommation électrique maximale possible du bâtiment s'élève actuellement à 100 A à 400 V. Pour le fonctionnement des pompes à chaleur, selon le mode de fonctionnement et la conception de la pompe à chaleur, une rénovation ou une extension de l'alimentation électrique peut être nécessaire. Sur la base des spécifications déterminées conformément au chapitre 10.1.1.3, les pompes à chaleur compactes suivantes d'Alpha Innotec (AIT) conviendraient à une installation à l'extérieur (concept de fonctionnement monovalent). La commande s'effectue via le réglage en cascade standard d'AIT. Afin de pouvoir satisfaire à la preuve de la protection contre le bruit, les capots d'isolation acoustique appropriés devraient être utilisés (voir schéma 66).

- Type : LW180A/LW 251A (1 pièce chacun)
- Capacité de chauffage @ A-8/W55 : 12/18 kW
- Température de départ maximale : 60 °C @ A- 10
- Efficacité : coefficient de performance COP (@ A-7/W50) 2,7/2,6, COP (@ A2/W35) 3,8/3,8
- Puissance acoustique : 57/62 dB (A)
- Protection par fusibles : 20/25 A (« lent »)
- Réfrigérant : R407C (GWP ~ 1770)
- Courant de démarrage : 30/30 A
- Poids : 420/540 kg
- Dimensions :
- LxHxP 1,9x1,8x1,1 m (LW180A)
  LxHxP 1,9x1,8x1,3 m (LW251A)

Schéma 65 : Pompe à chaleur air-eau d'AIT (source : AIT Schweiz AG)

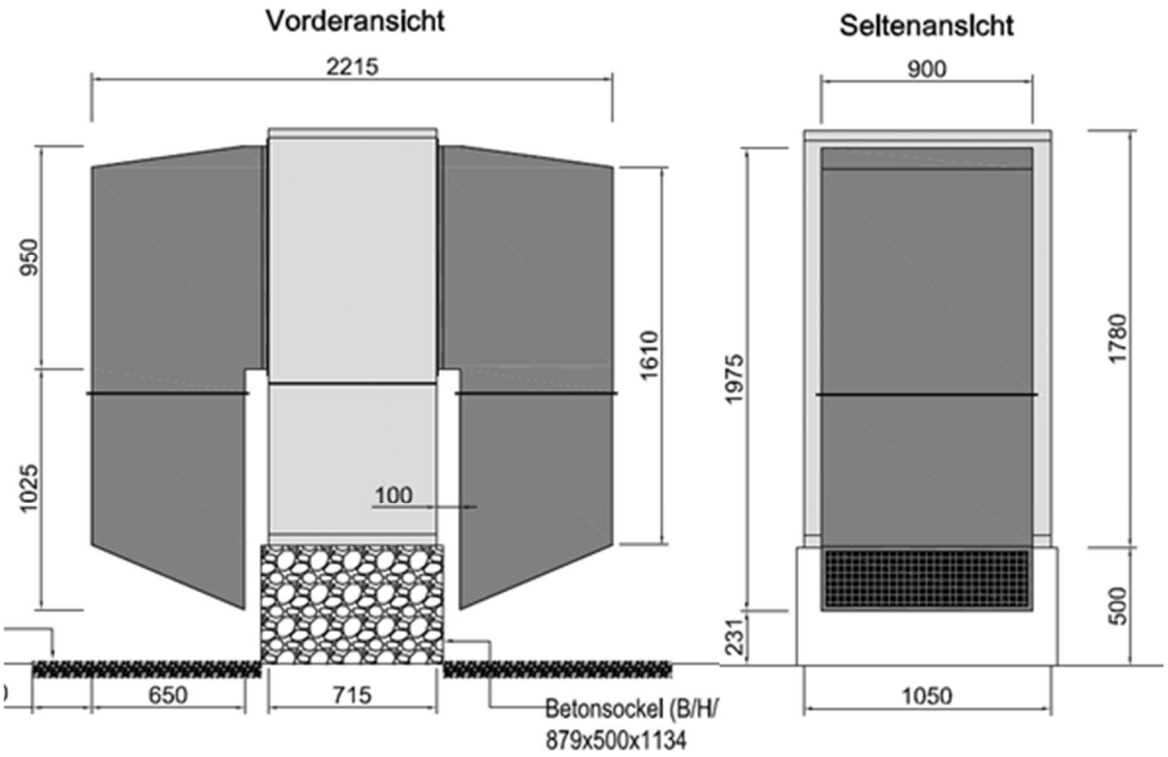


Schéma 66 : Pompe à chaleur air-eau de la société AIT Schweiz AG, dimensions avec capots d'isolation acoustique (source : AIT Schweiz AG)

Le système de pompe à chaleur, chargé de fournir l'énergie de chauffage, doit être soutenu jusqu'à la rénovation complète. Puisqu'il y a déjà une chaudière au fioul à remplacer, l'infrastructure existante doit être utilisée et la nouvelle chaudière à condensation complète SK20 de Meier Tobler AG doit être utilisée :

- Capacité de chauffage : 15-21 kW
- Protection par fusibles : monophasée 6 A (« lente »)
- Poids : 214 kg
- Dimensions : LxHxP 0,6x1,2x1,1 m

Schéma 67 : Chaudière au fioul à condensation complète (source : Meier Tobler AG)

10.1.2.2 Installation de la pompe à chaleur

Les schémas ci-dessous illustrent l'installation et la disposition des pompes à chaleur, le câblage ainsi que la chaudière au fioul et les autres composants nécessaires.

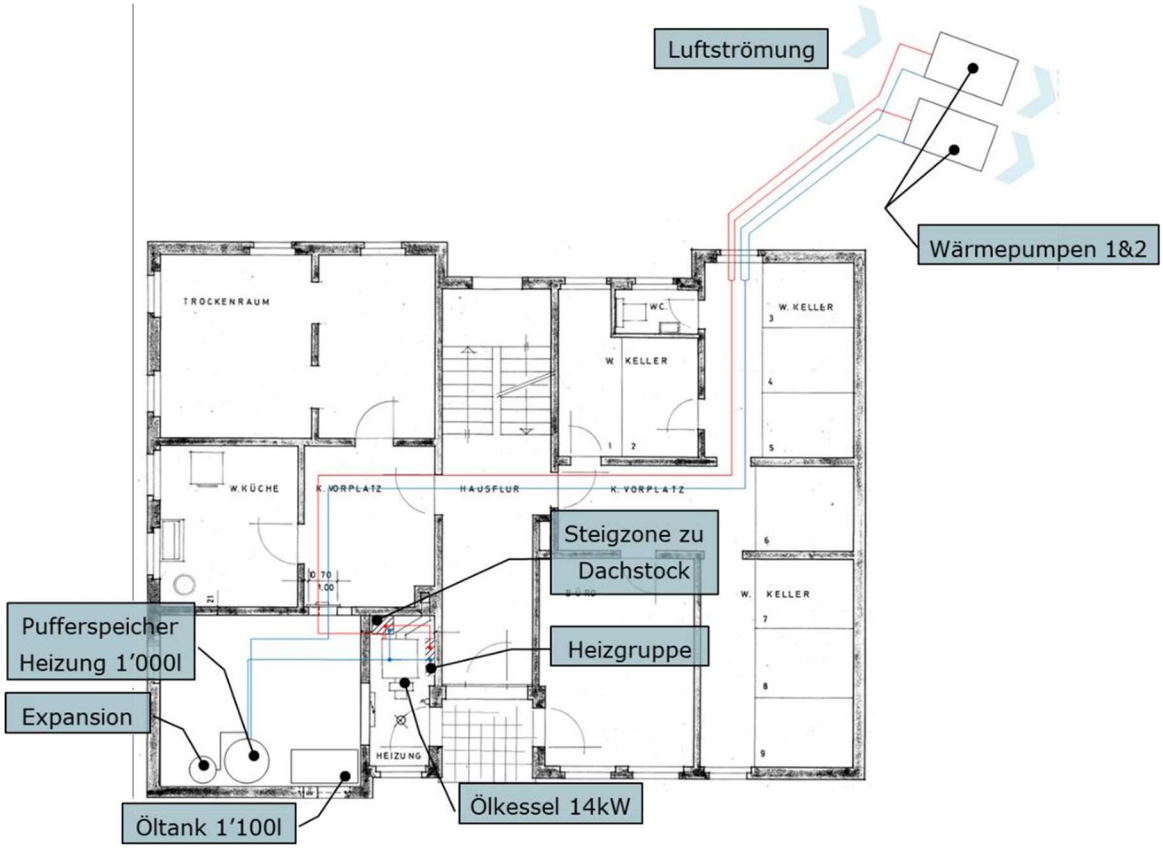


Schéma 68 : Plan sommaire du sous-sol, solution 1, rue Hofwiesenstrasse 126

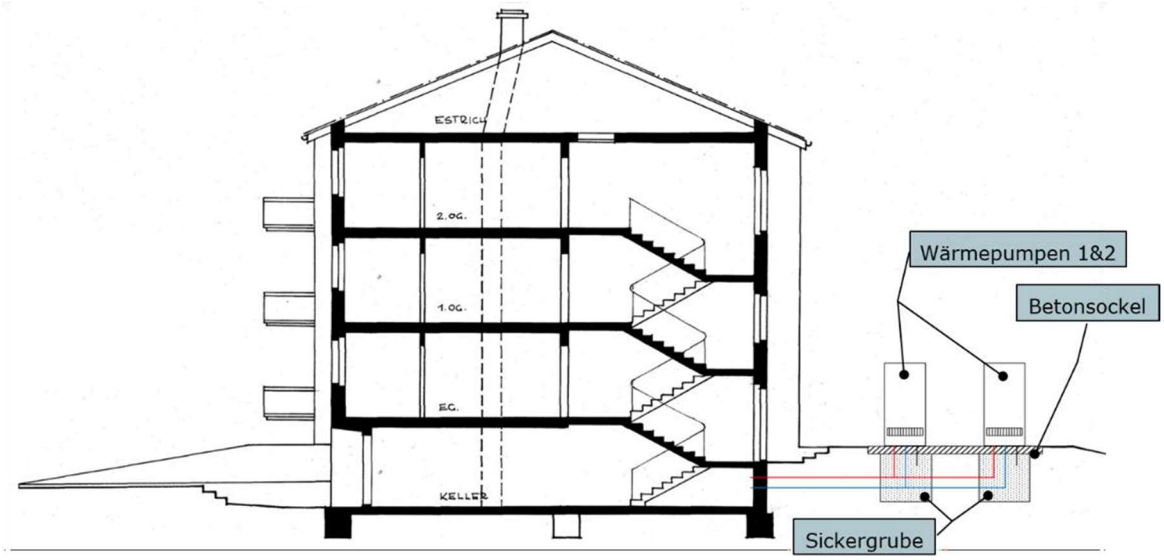


Schéma 69 : Vue sommaire, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 1

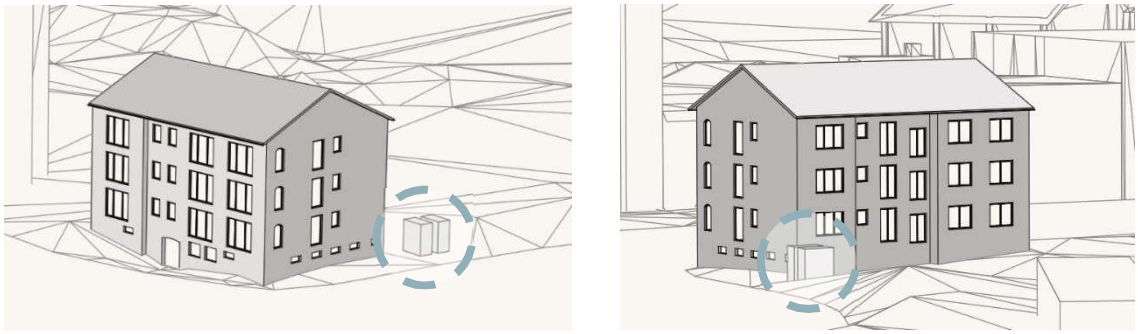


Schéma 70 : Visualisation 3D, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 1

10.1.2.3 Preuve de la protection contre le bruit

Afin de satisfaire à la preuve de la protection contre le bruit, des capots d'isolation acoustique doivent être utilisés pour les pompes à chaleur installées à l'extérieur. Les niveaux d'évaluation aux points de réception 1 et 2 les plus proches (48 et 32 dB (A)) montrent que le projet est éligible au niveau de sensibilité III (interprétation basée sur la preuve de la protection contre le bruit : Service de la voirie du canton de Zurich [17]).

Un exemple de calcul complet de la preuve de la protection contre le bruit figure à l'annexe 4 pour cet exemple.

- Niveau de puissance acoustique : 63 dB (A)
- Niveau de sensibilité : III (50 dB (A))
- Point de réception 1 : propre bâtiment
- Point de réception 2 : bâtiment voisin
- Installation : sur pieds (+3 dB)
- Correction de niveau K1 : fonctionnement de nuit +10 dB
- Correction de niveau K2 : à peine audible + 2 dB
- Correction de niveau K3 : à peine audible + 2 dB
- Mesures de protection contre le bruit : capots d'isolation acoustique -13 dB
- Point de réception du niveau de classification 1 : **48 dB (A)**
- Point de réception du niveau de classification 2 : **32 dB (A)**

Une installation extérieure de la pompe à chaleur air-eau prévue peut être approuvée, car le niveau d'évaluation aux points de réception est inférieur ou égal au niveau de puissance acoustique admissible en fonction du niveau de sensibilité.

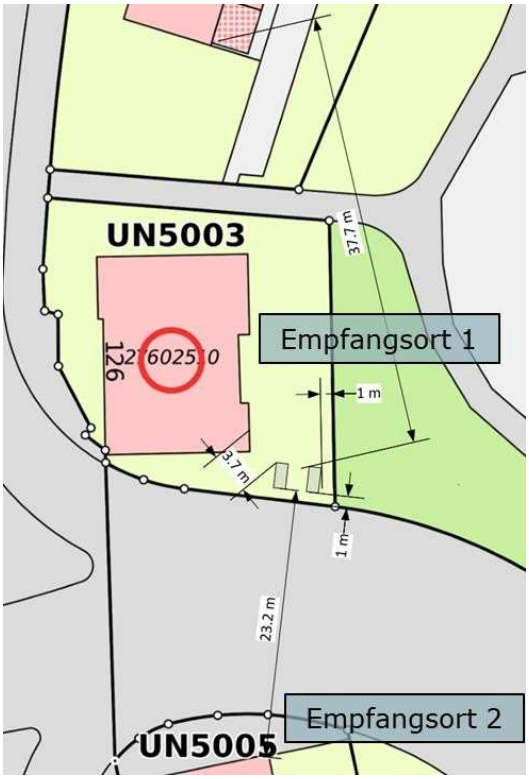


Schéma 71 : Preuve de la protection contre le bruit, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 1 (source : GIS-Broser ZH [16])

10.1.2.4 Intégration hydraulique et concept de réglage

Le schéma hydraulique suivant (également disponible à l'annexe 5) montre comment les pompes à chaleur installées à l'extérieur doivent être intégrées. On peut également voir comment le préchauffage de l'air frais et la chaudière au fioul fonctionnant en parallèle (enlevée après la rénovation complète) sont intégrés. Étant donné que la production d'eau chaude est réalisée séparément après la rénovation, cela n'est pas inclus dans le schéma.

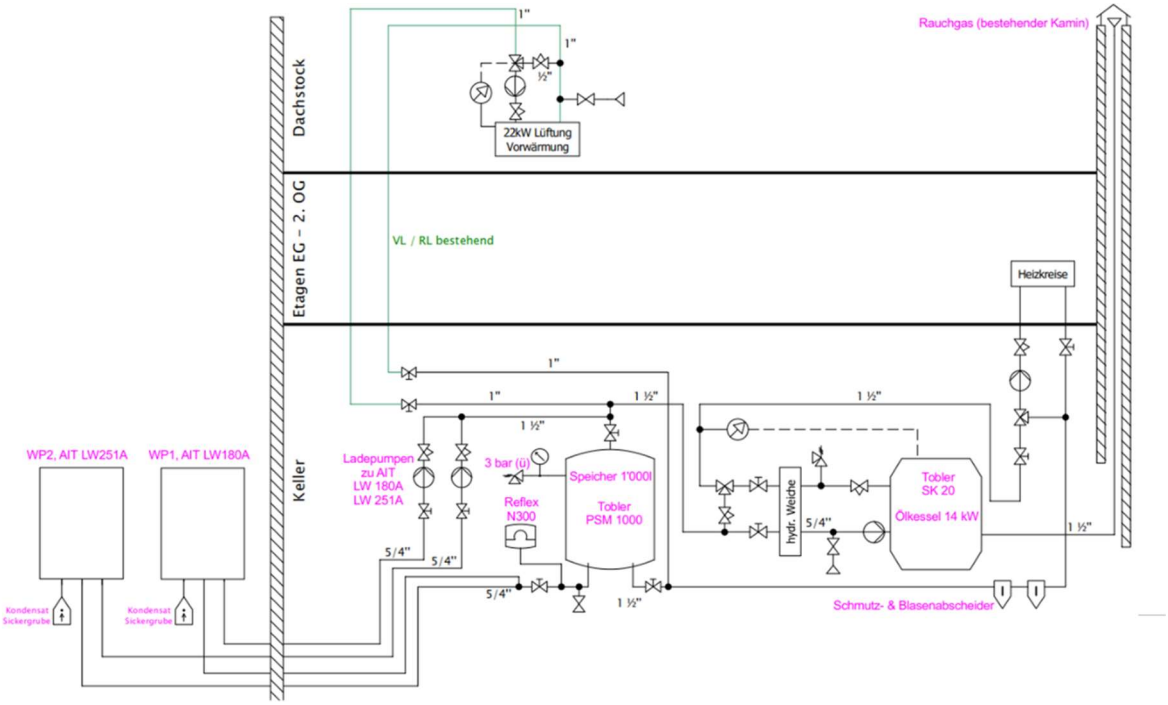


Schéma 72 : Intégration hydraulique, solution 1, rue Hofwiesenstrasse 126

10.1.2.5 Mesures structurelles

Les mesures structurelles nécessaires à la mise en œuvre comprennent les points suivants :

- Nettoyage, déconnexion et dépollution du réservoir de fioul
- Rénovation du compartiment du réservoir et création d'une porte dans le compartiment du réservoir
- Construction de fosses pour la pose souterraine des conduites de pompes à chaleur
- Création de carottages sur la paroi extérieure pour les traversées de parois, les pompes à chaleur, y compris l'étanchéité
- Création du site d'installation des pompes à chaleur (socle béton et écoulement condensats)
- Pose et montage des pompes à chaleur
- Travaux de jardinage, clôture, fosse, posse souterraine, pompes à chaleur
- Renforcement du raccordement électrique (jusqu'à 100 A) vu que le raccordement a plus de 60 ans, un remplacement pour cause de vétusté peut s'appliquer, les travaux sur le domaine privé doivent être à la charge du propriétaire, plus de 2250 CHF de contribution unique aux frais de réseau (voir annexe 3)
- Les tableaux électriques contenant de l'amiante doivent être remplacés

10.1.2.6 Fonctionnement du système

Les deux pompes à chaleur en cascade à régulation de puissance permettent de couvrir la puissance de chauffage requise sans surplus excessif, comme l'illustre le schéma 73. Toutefois, à une température ambiante inférieure à environ -6 °C, la puissance de la pompe à chaleur n'est pas suffisante (état avant la rénovation) et la chaudière au fioul est mise en marche à titre de support. Ces valeurs donnent un coefficient de chauffage annuel JAZH de 2,49. Après la rénovation complète du bâtiment, la pompe à chaleur en mode de fonctionnement monovalent peut garantir la puissance de chauffage requise jusqu'à une température ambiante de -10 °C et donc le seul chauffage du bâtiment.

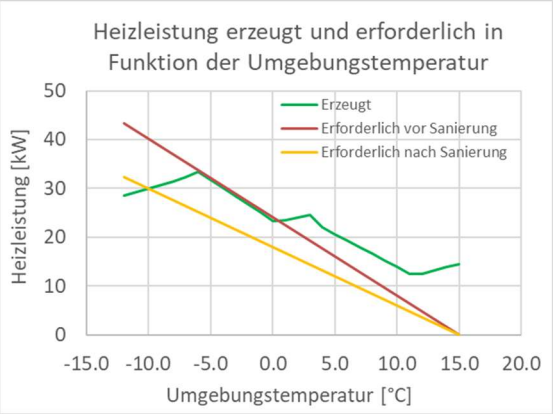


Schéma 73 : Aperçu de la puissance de chauffage requise dans la rue Hofwiesenstrasse 126 et de la puissance de chauffage générée par la ou les pompes à chaleur, solution 1

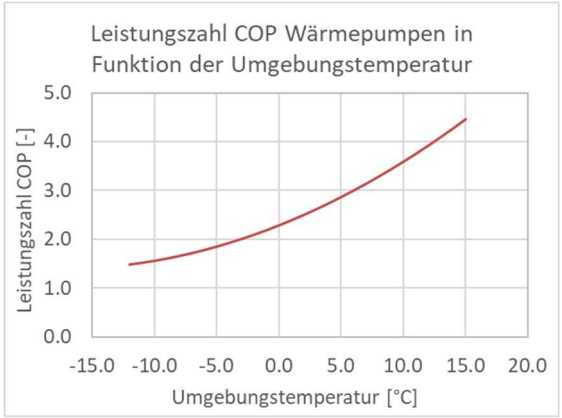


Schéma 74 : Comportement du coefficient de performance (COP) à température ambiante dans la rue Hofwiesenstrasse 126, solution 1

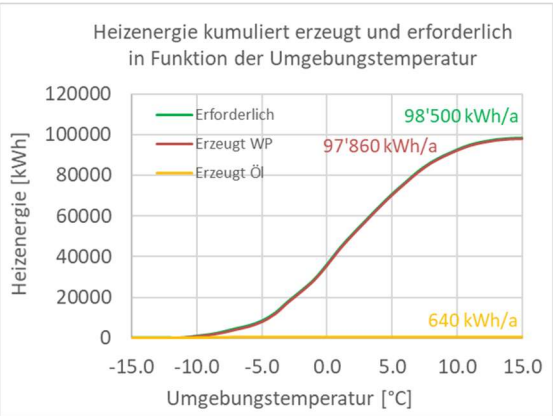


Schéma 75 : Énergie de chauffage annuelle dans la rue Hofwiesenstrasse 126, accumulée en fonction de la température extérieure, solution 1

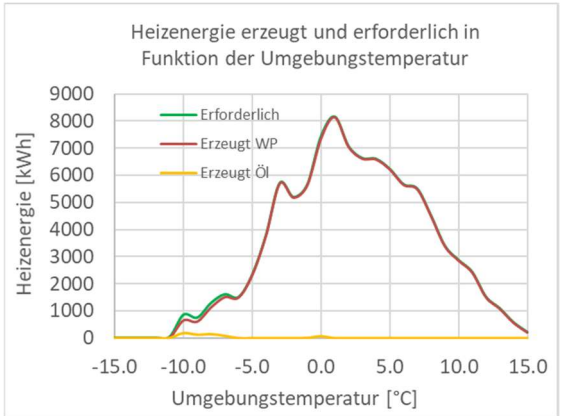


Schéma 76 : Énergie de chauffage annuelle dans la rue Hofwiesenstrasse 126, en fonction de la température extérieure, solution 1

10.1.2.7 Synthèse des coûts

La liste suivante montre les coûts d'investissement nécessaires et les coûts annuels qui en résultent. Le fonctionnement avant la rénovation a été pris en compte, y compris le fonctionnement de la chaudière au fioul. Les coûts d'exploitation et d'investissement d'un système supplémentaire de production d'eau chaude n'ont pas été pris en compte. Il faut également mentionner que les coûts de rénovation de la distribution d'eau chaude n'ont pas été pris en compte. Les calculs sont basés sur les offres indicatives obtenues.

Coûts d'investissement

Les coûts indiqués correspondent au stade de l'étude de faisabilité (+/- 25 %) et sont valables s'ils sont mis en œuvre dans la ville de Zurich. Les frais d'investissement totaux selon les offres obtenues s'élèvent à 178 200 CHF (voir tableau 12).

Tableau 12 : Récapitulatif des coûts d'investissement, Hofwiesenstrasse 126, solution 1

Poste	Coût HT avec étude de faisabilité +/- 25 % [CHF]	Durée d'utilisation [a]	Coûts de maintenance [%]
1. Travaux préliminaires			
1.2 Site d'installation des travaux de jardinage, pompe à chaleur : Creusement et pose de conduites souterraines, fosse septique, socle d'installation des fondations en béton	7 500	30	0
2. Technique/source de chaleur			
2.1 Câbles de raccordement : pose des conduites d'eau de chauffage souterraines de manière isolée	3 100	20	0,5
2.2 Capots d'isolation acoustique des pompes à chaleur	22 400	20	0,5
3. Approvisionnement énergétique			
3.1 Réservoir de fioul : nouveau réservoir en plastique	1 200	30	2
3.2 Production de fioul	400	30	1,5
4. Génération de chaleur			
4.1 Chaudière : chaudière au fioul Tobler SK20	10 000	20	2,5
4.2 Pompes à chaleur : pompe à chaleur air-eau AIT LW180A & AIT LW251A	39 300	20	3,5
4.3 Intégration hydraulique de la production de chaleur : pompes, vannes de commutation, séparateur hydraulique, divers accessoires de tuyauteries, postes de travaux 2 à 5	14 900	20	0,5
4.4 Accumulateur thermique : réservoir d'accumulation, chauffage et accessoires de tuyauterie	2 000	30	0,5
4.5 Isolation : isolation des canalisations et des accessoires de tuyauteries	4 800	30	0
5. Cheminée			

5.1 Cheminée : matériel de cheminée	600	20	2,5
6. Distribution de chaleur			
6.1 Distributeur de chaleur : pompes, mitigeurs, divers accessoires de tuyauteries, travaux	3 500	30	1
6.2 Extension : groupe d'extension et de sécurité, y compris divers accessoires de tuyauteries, travaux	4 100	20	1
9. Sanitaire			
9.1 Ballon d'eau chaude	0	20	2,5
9.2 Distributeur	0	40	1,5
9.3 Isolations	0	30	0
15. Technique du système de mesurage, de commande, de régulation et de contrôle			
15.1 Appareils de terrain : régulateurs et capteurs, pompe à chaleur et chaudière au fioul	2 700	15	1,5
15.2 Mise en service : mise en service des pompes à chaleur et des chaudières au fioul par les techniciens de service	4 200	15	0
16. Électricité			
16.1 Démontage : travaux et élimination	1 000	15	0
16.2 Câblage : matériel électrique et travaux	10 000	20	1
16.3 Extension de la ligne d'alimentation/de l'alimentation : travaux du Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz) et contribution aux coûts de réseau	3 000	20	1
17. Travaux annexes			
17.1 Travaux de démolition : travaux et dépollution du système de chauffage existant	1 100	20	0
17.2 Grue/pose : pose des pompes à chaleur	500	20	0
17.3 Rénovation du compartiment du réservoir : nettoyage, déconnexion, démontage et dépollution du réservoir de fioul, création de l'embrasure de porte et des portes	7 600	20	0
17.4 Tranchées de câbles, extension de la ligne d'alimentation : travaux de creusement, pose de tuyaux vides et carottage, incluant le matériel	3 800	20	0
18. Honoraires			
18.1 Honoraires : ingénieur HLKKSE, ingénieur de génie civil, autorisations	30 500	20	0
Total des coûts d'investissement	***178 200***		

Coûts annuels

Les coûts annuels qui en résultent ont été déterminés en utilisant l'outil « Comparaison des variantes - Systèmes énergétiques » du Service de la construction de bâtiments de la ville de Zurich [18]. Les données sous-jacentes sont :

- Taux d'intérêt des calculs : 2,5 %
- Période d'observation : 15 ans

La période d'observation est pertinente par rapport à l'augmentation imputée des prix de l'énergie. Les augmentations de prix utilisées cette étude figurent à l'annexe 20. D'autres données de base, telles que les prix de l'énergie, se trouvent également à l'annexe 20. Les subventions qui peuvent être demandées dans le cadre des subventions de 2000 watts du Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz) sont énumérées à l'annexe 21. Les valeurs se rapportent au fonctionnement avant la rénovation complète (y compris le fonctionnement de la chaudière au fioul) et sans la production d'eau chaude supplémentaire requise par des chaudières avec une pompe à chaleur séparée.

Tableau 13 : Aperçu des coûts annuels dans la rue Hofwiesenstrasse 126, solution 1

Désignation	Montant
Contributions de financement uniques – contributions de 2000 watts (Service d'électricité de la ville de Zurich – EWZ)	3 387 CHF
Coûts énergétiques annuels	11 170 CHF
Coûts de maintenance annuels	2 130 CHF
Coût annuel du capital hors subventions	11 240 CHF
Coûts d'investissement annuels **avec subventions**	11 030 CHF
Coûts annuels totaux hors subventions	24 540 CHF
Coûts annuels totaux **avec subventions**	24 330 CHF
Coûts de production de chaleur hors subventions	24,9 centimes/kWh
Coûts de production de chaleur **avec subventions**	**24,7 centimes/kWh**

10.1.3 Étude de projets, solution 2 – installation au sous-sol – monovalent après la rénovation

10.1.3.1 Mode de fonctionnement et dimensionnement de la puissance de chauffage de la pompe à chaleur

D'après les spécifications du chapitre 10.1.1.3, la pompe à chaleur compacte LW 380 d'Alpha Innotec (1 unité) peut être utilisée pour un concept de fonctionnement monovalent – installation au sous-sol – avec les caractéristiques suivantes :

- Puissance de chauffage @ A-8/W50 : 32 kW
- Température de départ maximale : 50 °C @ A-10
- Efficacité : COP @ A-7/W50 2,2, COP @ A2/W35 3,9
- Puissance acoustique : 58 dB (A)
- Protection par fusibles : 40 A (« lente »)
- Courant de démarrage : 52 A
- Réfrigérant : R404A (GWP ~ 3920)
- Poids : 505 kg
- Dimensions : LxHxP 0,8x1,9x1,3 m

Schéma 77 : Pompe à chaleur air-eau Alpha Innotec (source : Alpha Innotec AG)

La chaudière au fioul SK20 déjà mentionnée de Meier Tobler AG est utilisée à titre de support jusqu'au moment de la rénovation complète :

- Puissance de chauffage : 15-21 kW
- Protection par fusibles : monophasée 6 A (« lente »)
- Poids : 214 kg
- Dimensions : LxHxP 0,6x1,2x1,1 m

Schéma 78 : Chaudière à condensation complète SK20 (source : Meier Tobler AG)

10.1.3.2 Installation de la pompe à chaleur

Les schémas suivants montrent le plan de la rue Hofwiesenstrasse 126 dans son état actuel et après la rénovation complète prévue. De plus, le schéma 81 montre l'abaissement nécessaire du niveau du sol en raison des ouvertures de façade requises pour les conduites.

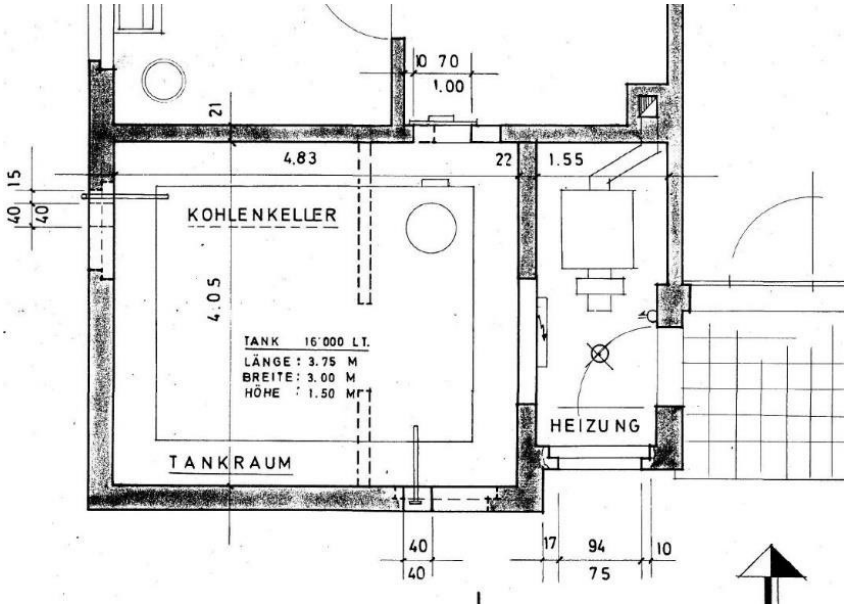


Schéma 79 : Plan sommaire du sous-sol de la rue Hofwiesenstrasse 126, état actuel (source : Service d'inspection des constructions en hauteur de Zurich (devenu Office des bâtiments AHB)

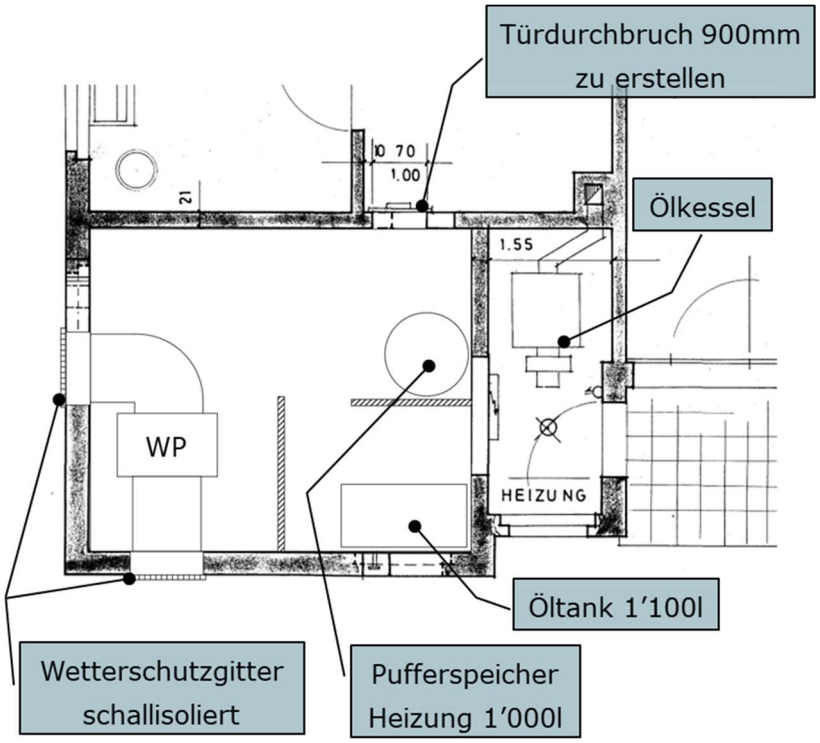


Schéma 80 : Plan sommaire du sous-sol de la rue Hofwiesenstrasse 126, après rénovation, solution 2

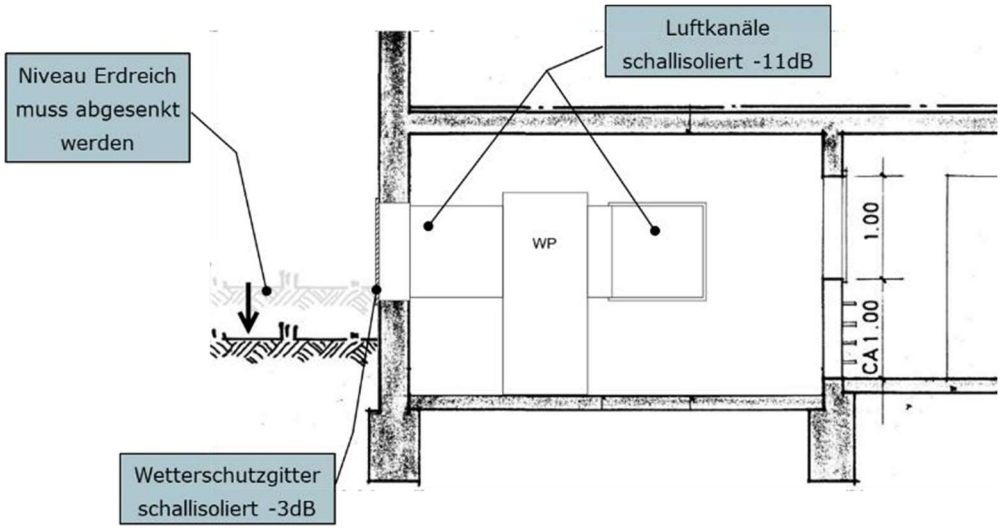


Schéma 81 : Disposition du sous-sol, rue Hofwiesenstrasse 126, coupe après rénovation, solution 2

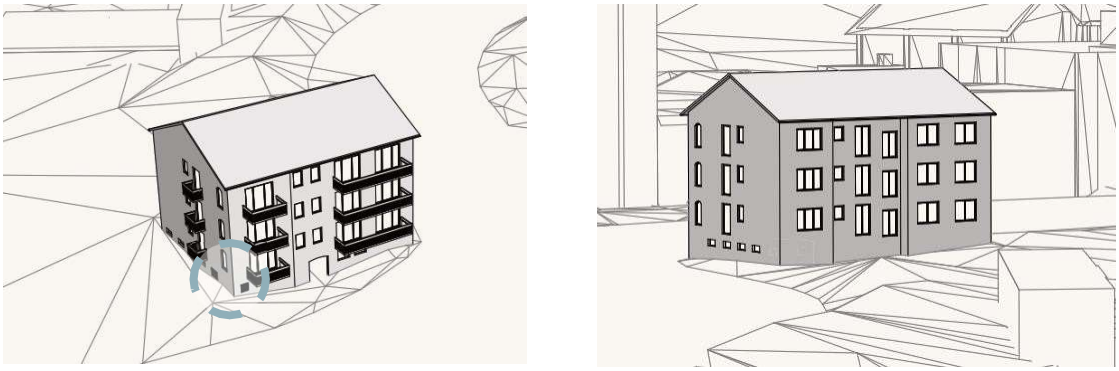


Schéma 82 : Visualisation 3D, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 2

10.1.3.3 Preuve de la protection contre le bruit

Pour que la preuve de la protection contre le bruit puisse être apportée, la ventilation vers et depuis la pompe à chaleur installée au sous-sol doit être réalisée avec des conduits de ventilation insonorisés. Il en résulte un niveau d'évaluation de 48 dB (A) [17] au point de réception le plus proche 1, qui, avec le niveau de sensibilité du bien immobilier, est considéré comme éligible.

- Niveau de puissance acoustique : 58 dB (A)
- Niveau de sensibilité : III (50 dB (A))
- Point de réception 1 : propre bâtiment
- Installation : pompe à chaleur dans le bâtiment (+6 dB)
- Correction de niveau K1 : fonctionnement de nuit +10 dB
- Correction de niveau K2 : à peine audible + 2 dB
- Correction de niveau K3 : à peine audible + 2 dB
- Protection contre le bruit : grille de protection contre les intempéries -3 dB
- Protection contre le bruit : conduits de ventilation isolés -11 dB
- Point de réception du niveau de classification 1 : 48 dB (A)

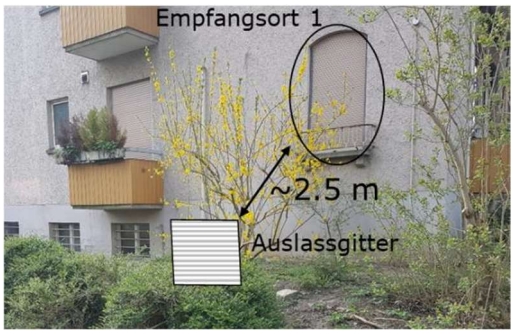


Schéma 83 : Preuve de la protection contre le bruit dans la rue Hofwiesenstrasse 126, solution 2

Une installation intérieure dans le compartiment du réservoir peut être approuvée avec une pompe à chaleur air-eau **susceptible d'obtenir une autorisation**.

10.1.3.4 Intégration hydraulique et concept de réglage

Comme dans la solution 1, la pompe à chaleur installée à l'intérieur est intégrée, et ce en fonctionnement parallèle avec la chaudière au fioul (jusqu'à après la rénovation complète). L'eau chaude est produite séparément (voir l'annexe 6).

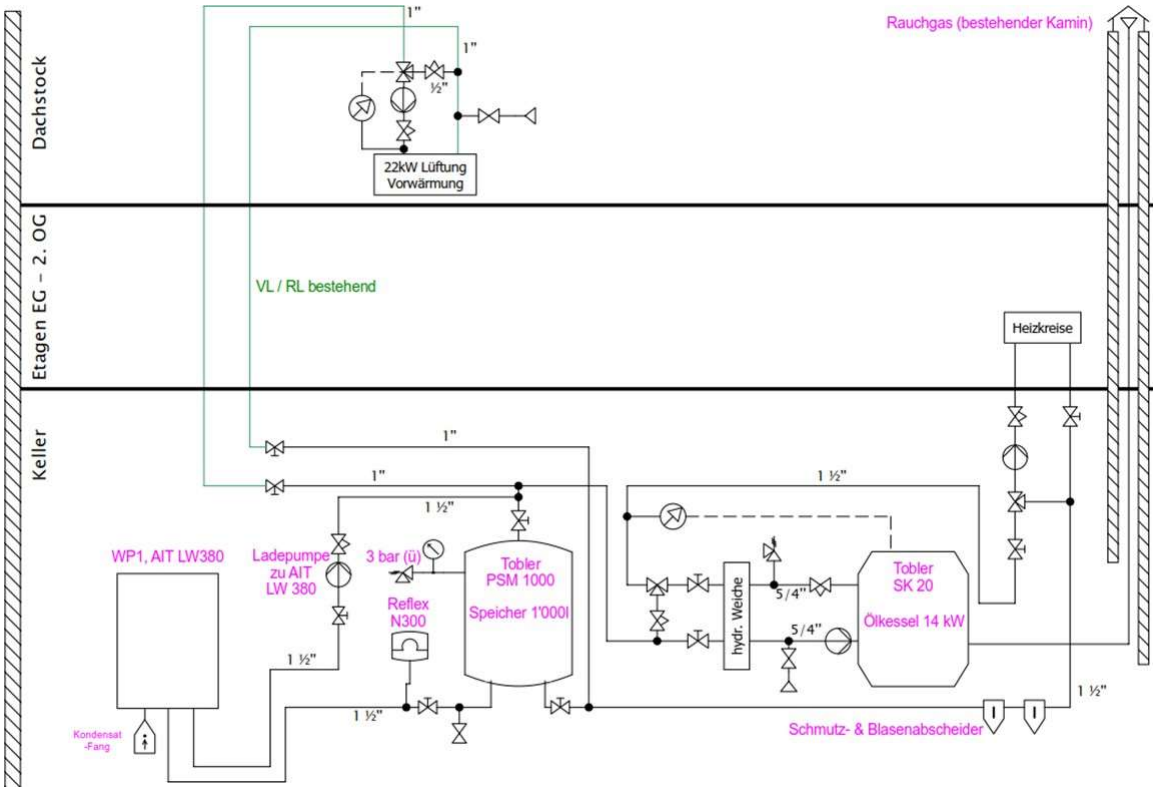


Schéma 84 : Intégration hydraulique, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 2

10.1.3.5 Mesures structurelles

Les mesures structurelles suivantes doivent être prises pour la mise en œuvre du projet :

- Nettoyage, déconnexion et dépollution du réservoir de fioul
- Rénovation du compartiment du réservoir et création d'une embrasure de porte dans le compartiment du réservoir
- Abaissement du sol de la façade nord
- Création de traversées murales pour l'installation des conduits de ventilation
- Création d'un socle pour l'installation de la pompe à chaleur
- Pose et montage de la pompe à chaleur
- Montage de conduits de ventilation et grille de protection contre les intempéries
- Renforcement du raccordement électrique (à 100 A) vu que le raccordement a plus de 60 ans, un remplacement pour cause de vétusté peut s'appliquer, les travaux sur le domaine privé doivent être à la charge du propriétaire, plus de 2250 CHF à titre de contribution unique aux frais de réseau (voir annexe 3)
- Remplacer les tableaux électriques contenant de l'amiante

10.1.3.6 Fonctionnement du système

Le coefficient de performance annuel calculé pour le chauffage des pompes à chaleur avant la rénovation complète du bâtiment JAZH est de 2,70. Celui-ci est calculé en tenant compte de la distribution horaire des fréquences, de la température ambiante à Zurich et de la courbe de chauffage d'après le chapitre 10.1.1.3 (VL/RL 60/47 °C @ A-10°C).

Cette pompe à chaleur à régulation de puissance peut fonctionner en continu avec régulation de puissance pour ce bien immobilier dans une plage de température extérieure de 0 °C à 4 °C (voir schéma 85 : Aperçu de la puissance de chauffage requise de la Hofwiesenstrasse 126 et de la chaleur de puissance thermique générée, solution 2). Si la température ambiante est inférieure à environ -6 °C, la chaudière au fioul doit être utilisée à titre de support avant la rénovation complète du bâtiment. Après la rénovation complète du bâtiment, la pompe à chaleur peut fournir la puissance de chauffage requise en fonctionnement monovalent jusqu'à une température ambiante de -11 °C et ainsi assurer le chauffage unique du bâtiment.

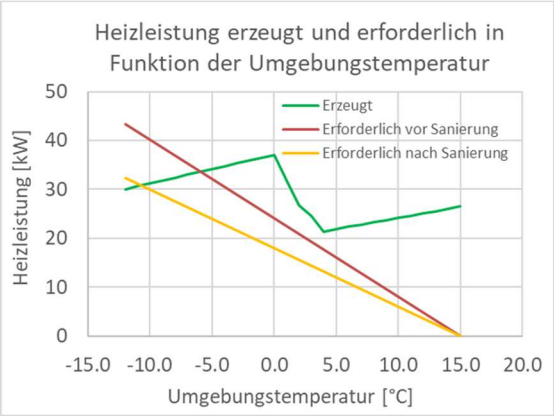


Schéma 85 : Aperçu de la puissance de chauffage requise de la rue Hofwiesenstrasse 126 et de la puissance de chauffage générée par la ou les pompes à chaleur, solution 2

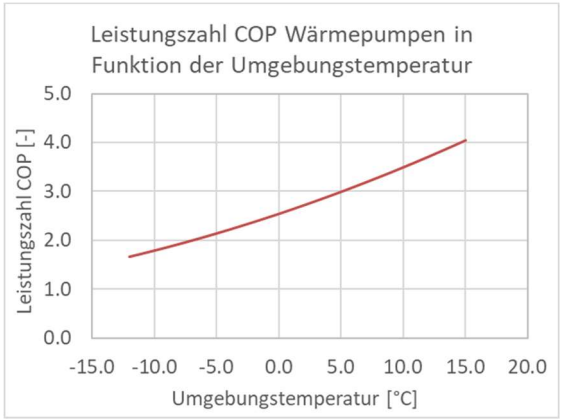


Schéma 86 : Comportement du coefficient de performance (COP) à température ambiante, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 2

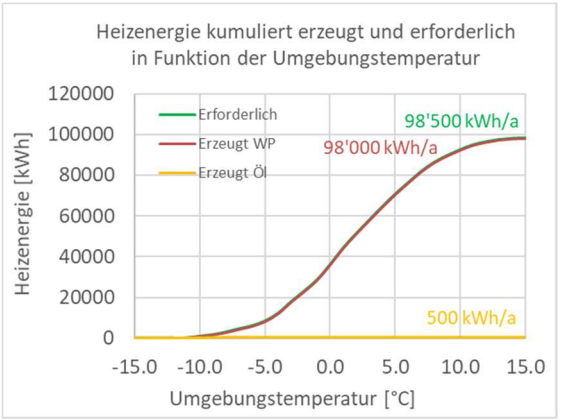


Schéma 87 : Énergie de chauffage annuelle, rue Hofwiesenstrasse 126, accumulée en fonction de la température extérieure, solution 2

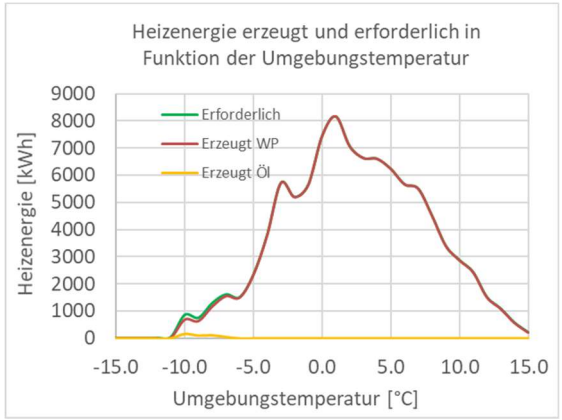


Schéma 88 : Énergie de chauffage annuelle, rue Hofwiesenstrasse 126, en fonction de la température extérieure, solution 2

10.1.3.7 Synthèse des coûts

Le résumé suivant présente les coûts d'investissement nécessaires et les coûts annuels qui en résultent. Le fonctionnement avant la rénovation a été pris en compte, y compris le fonctionnement de la chaudière au fioul. Les coûts d'exploitation et d'investissement d'un système supplémentaire de production d'eau chaude n'ont pas été pris en compte. Il faut également mentionner que les coûts de rénovation de la distribution d'eau chaude n'ont pas été pris en compte. Les calculs sont basés sur les offres indicatives obtenues.

Coûts d'investissement

Les coûts indiqués correspondent au stade de l'étude de faisabilité (+/- 25 %) et sont valables s'ils sont mis en œuvre dans la ville de Zurich. Les frais d'investissement totaux d'après les offres obtenues s'élèvent à 136 500 CHF +/- 25 % (voir tableau 14).

Tableau 14 : Récapitulatif des coûts d'investissement, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 2

Poste	Coût HT avec étude de faisabilité +/- 25 % [CHF]	Durée d'utilisation [a]	Coûts de maintenance [%]
1. Travaux préliminaires			
1.1 Travaux de jardinage : abaissement du sol de la façade nord, incluant les travaux et la dépollution	1 000	30	0
1.2 Traversées murales des conduits de ventilation : création de traversées murales des façades nord et ouest	3 000	30	0
2. Technique/source de chaleur			
2.1 Conduits de ventilation : conduites de ventilation insonorisés et grille de protection contre les intempéries, incluant les travaux	12 000	20	0,5
3. Approvisionnement énergétique			
3.1 Réservoir de fioul : nouveau réservoir en plastique	1 200	30	2
3.2 Production du fioul	400	30	1,5
4. Génération de chaleur			
4.1 Chaudière : chaudière au fioul Tobler SK20	10 000	20	2 5
4.2 Pompes à chaleur : pompe à chaleur air-eau AIT LW 380	30 500	20	3,5
4.3 Intégration hydraulique de la production de chaleur : pompes, vannes de commutation, séparateur hydraulique, divers accessoires de tuyauteries, travaux, portes 2 à 5	11 200	20	0,5
4.4 Accumulateur de chaleur : réservoir d'accumulation, chauffage, incluant les accessoires de tuyauteries	2 000	20	0,5
4.5 Isolation : isolation des canalisations et des accessoires de tuyauteries	3 200	30	0

5. Cheminée			
5.1 Cheminée : matériel de cheminée	600	20	2,5
6. Distribution de chaleur			
6.1 Distributeur de chauffage : pompes, mitigeurs, divers accessoires de tuyauteries, travaux	3 400	30	1
6.2 Extension : groupe d'extension et de sécurité, incluant divers accessoires de tuyauterie, travaux	4 100	20	1
9. Sanitaire			
9.1 Ballon d'eau chaude	0	20	2,5
9.2 Distributeur	0	40	1,5
9.3 Isolations	0	30	0
15. Technique du système de mesurage, de commande, de régulation et de contrôle			
15.1 Appareils de terrain : régulateurs et capteurs, pompes à chaleur et chaudière au fioul	200	15	1,5
15.2 Mise en service : mise en service des pompes à chaleur et des chaudières au fioul par les techniciens de service	3 200	15	0
16. Électricité			
16.1 Démontage : travaux et élimination	1 000	15	0
16.2 Câblage : matériel électrique et travaux	8 800	20	1
16.3 Extension de la ligne d'alimentation/de l'alimentation : travaux du Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz) et contribution aux coûts de réseau	3 000	20	1
17. Travaux annexes			
17.1 Travaux de démolition : élimination de vieux système de chauffage, incluant les travaux et les frais	1 100	20	0
17.2 Grue/pose : pose des pompes à chaleur	300	20	0
17.3 Rénovation du compartiment du réservoir : nettoyage, déconnexion, démontage et dépollution du réservoir de fioul, création de l'embrasure de porte et de portes	7 600	20	0
17.4 Tranchées de câbles, extension de la ligne d'alimentation : travaux de creusement, pose de tuyaux vides et carottage, incluant le matériel	3 800	20	0
18. Honoraires			
18.1 Honoraires : ingénieur HLKKSE, ingénieur du génie civil, autorisations	24 900	20	0
Total des coûts d'investissement	***136 500***		

Coûts annuels

Les coûts annuels qui en résultent ont été déterminés en utilisant l'outil « Comparaison des variantes - Systèmes énergétiques » du Service de la construction de bâtiments de la ville de Zurich [18]. Les données sous-jacentes sont :

- Taux d'intérêt des calculs : 2,5 %
- Période d'observation : 15 ans

La période d'observation est pertinente par rapport à l'augmentation imputée des prix de l'énergie. Les augmentations de prix utilisées dans cette étude figurent à l'annexe 20. D'autres données de base, telles que les prix de l'énergie, se trouvent également à l'annexe 20. Les subventions qui peuvent être demandées dans le cadre des subventions de 2000 watts du Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz) sont énumérées à l'annexe 21. Les valeurs se rapportent au fonctionnement avant la rénovation complète (y compris le fonctionnement de la chaudière au fioul) et sans la production d'eau chaude supplémentaire requise par des chaudières avec une pompe à chaleur séparée.

Tableau 15 : Aperçu des coûts annuels, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 2

Désignation	Montant
Contributions de financement uniques – contributions de 2000 watts (Service d'électricité de la ville de Zurich – EWZ)	3 387 CHF
Coûts énergétiques annuels	10 540 CHF
Coûts de maintenance annuels	1 690 CHF
Coût annuel du capital hors subventions	8 590 CHF
Coûts d'investissement annuels **avec subventions**	8 380 CHF
Coûts annuels totaux hors subventions	20 820 CHF
Coûts annuels totaux **avec subventions**	20 610 CHF
Coûts de production de chaleur hors subventions	21,1 centimes/kWh
Coûts de production de chaleur **avec subventions**	**20,9 centimes/kWh**

10.1.4 Étude de projets, solution 3 – installation dans le grenier – monovalente après la rénovation

10.1.4.1 Mode de fonctionnement et dimensionnement de la puissance de chauffage de la pompe à chaleur

Deux pompes à chaleur air-eau LI 24TES de Glen Dimplex conviennent au concept de fonctionnement monovalent avec une installation dans le grenier. Afin de pouvoir contrôler ces deux appareils en cascade à un niveau supérieur, le réglage en cascade WOM EconM de Glen Dimplex est également nécessaire.

- Puissance de chauffage @ A-8/W55 : 15,5 kW
- Température de départ maximale : 55 °C @ A-10
- Efficacité : COP @ A-7/W55 1,9, COP @ A2/W35 3,4
- Puissance acoustique : 61 dB (A)
- Protection par fusibles : 25 A (« lente »)
- Courant de démarrage : 23 A
- Réfrigérant : R410A (GWP ~ 2090)
- Poids : 322 kg
- Dimensions : LxHxP 0,8x1,7x1,0 m

Schéma 89 : Pompe à chaleur air-eau Glen Dimplex (source : Walter Meier AG)

Le fonctionnement bivalent jusqu'à la fin de la rénovation est garanti par une chaudière au fioul SK20 de Meier Tobler AG.

- Puissance de chauffage : 15-21 kW
- Protection par fusibles : monophasée 6 A (« lente »)
- Poids : 214 kg
- Dimensions : LxHxP 0,6x1,2x1,1 m

Schéma 90 : Chaudière au fioul à condensation complète (source : Meier Tobler AG)

10.1.4.2 Installation de la pompe à chaleur

Les illustrations suivantes visualisent l'installation des deux pompes à chaleur dans le grenier ainsi que le câblage et le positionnement des composants tels que le réservoir, la vase d'expansion et la chaudière au fioul au sous-sol.

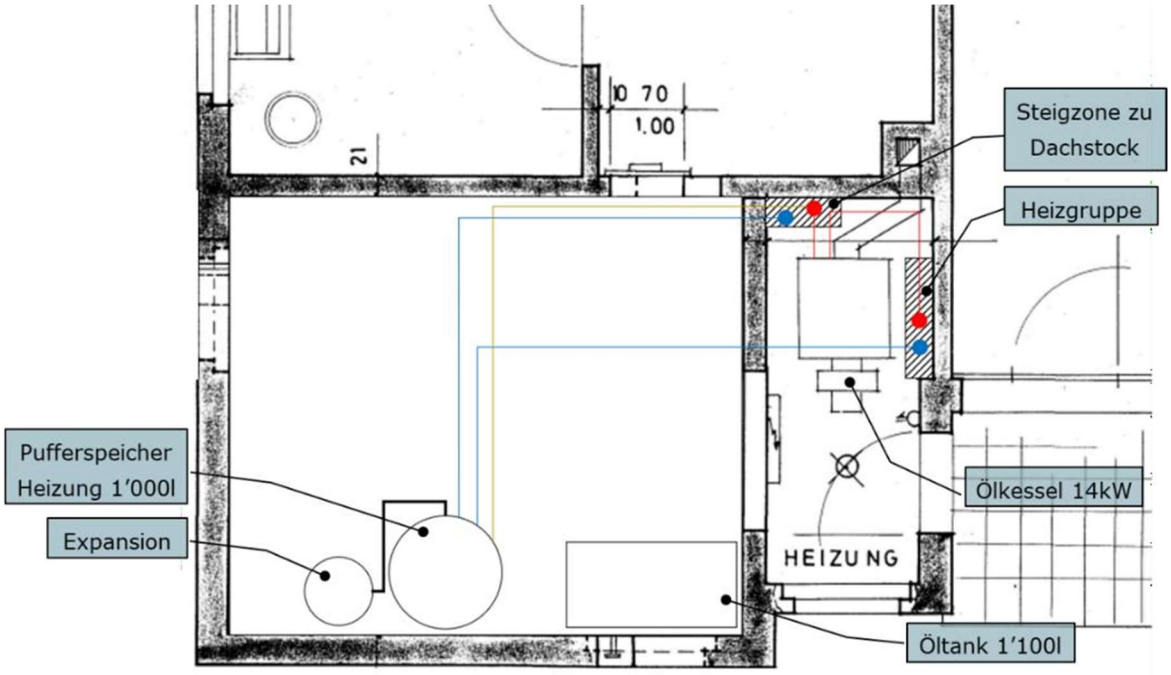


Schéma 91 : Plan sommaire du sous-sol, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 3

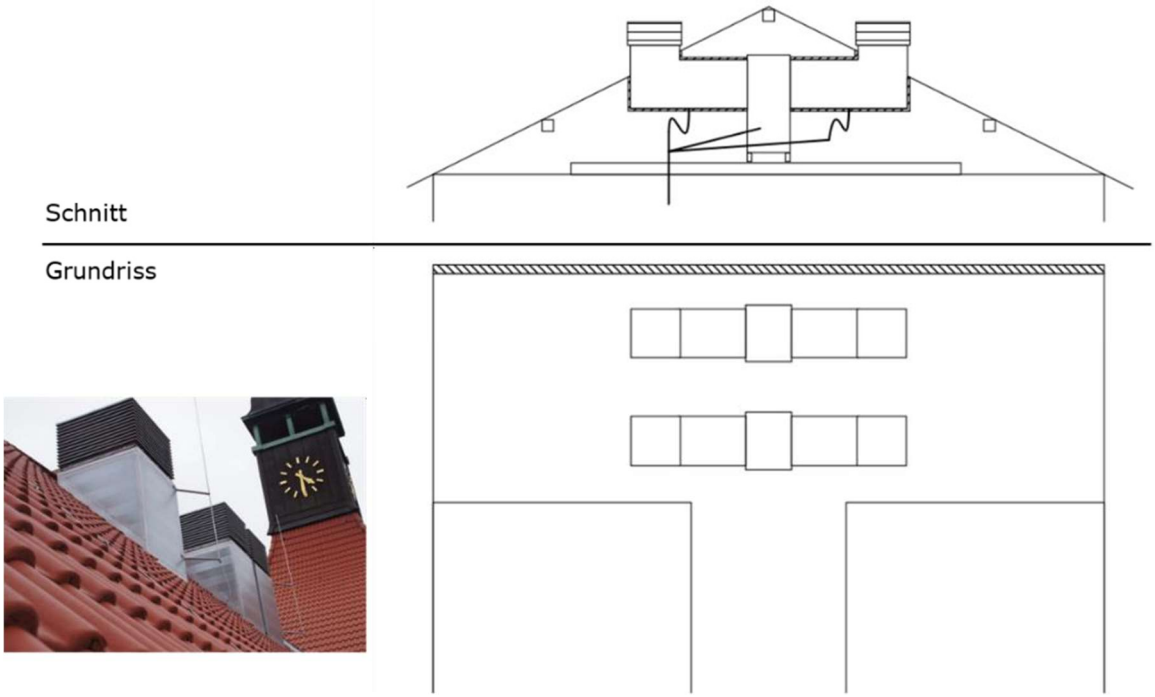


Schéma 92 : Disposition au grenier Hofwiesenstrasse 126, solution 3

Schéma 93 : Visualisation 3D, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 3

10.1.4.3 Preuve de la protection contre le bruit

L'installation intérieure dans le grenier se traduit par une distance de 7 m de la source (cheminées de sortie) au point de réception le plus proche 1. Avec les conduits de ventilation isolés et les grilles de protection contre les intempéries, le niveau de puissance au point de réception est de 50 dB (A) ; le projet est susceptible d'obtenir une autorisation.

- Niveau de puissance acoustique : 61 dB (A)
- Niveau de sensibilité : III (50 dB (A))
- Point de réception 1 : propre bâtiment
- Installation : pompe à chaleur dans le bâtiment (+6 dB)
- Correction de niveau K1 : fonctionnement de nuit +10 dB
- Correction de niveau K2 : à peine audible + 2 dB
- Correction de niveau K3 : à peine audible + 2 dB
- Protection contre le bruit : grille de protection contre les intempéries -3 dB
- Protection contre le bruit : conduits de ventilation isolés -3 dB
- Point de réception du niveau de classification 1 : 50 dB (A)

L'installation intérieure d'une pompe à chaleur air-eau courant dans le grenier est **susceptible d'obtenir une autorisation**.

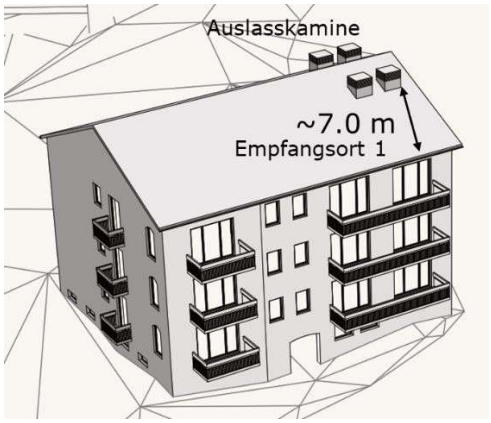


Schéma 94 : Preuve de la protection contre le bruit, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 3

10.1.4.4 Intégration hydraulique et concept de réglage

Les deux pompes à chaleur dans le grenier sont actionnées par le contrôleur de niveau supérieur de Glen Dimplex. Les conduites d'eau chaude peuvent être acheminées vers le local technique du sous-sol via la conduite existante du système de préchauffage de l'air (voir également l'annexe 7).

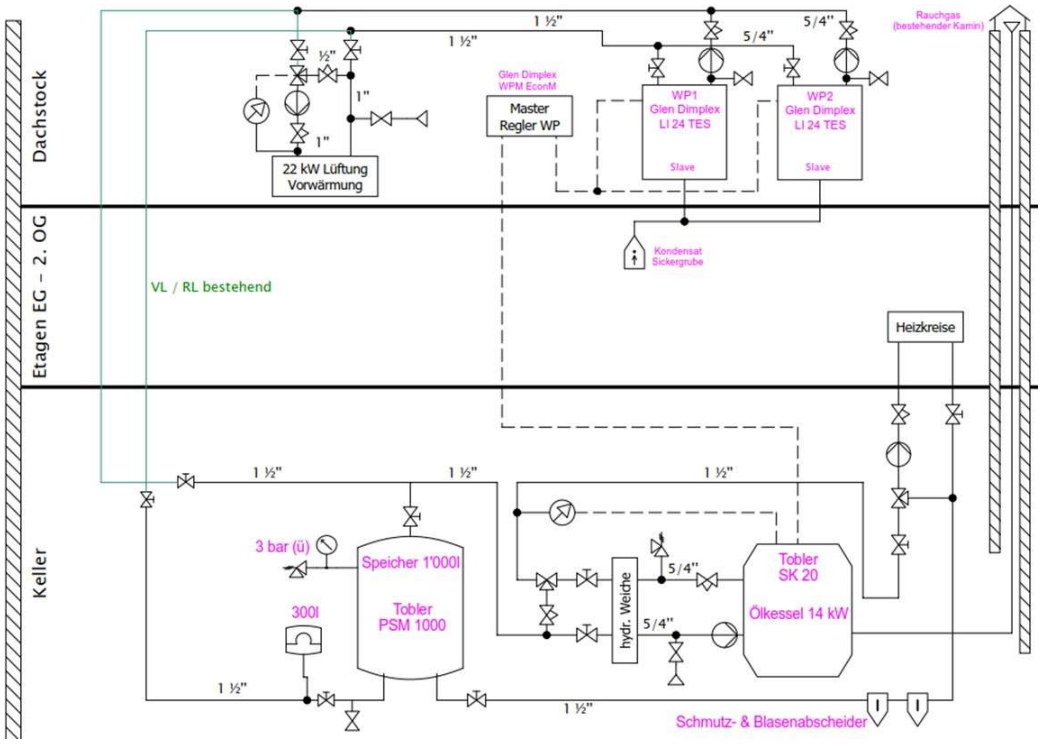


Schéma 95 : Intégration hydraulique, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 3

10.1.4.5 Mesures structurelles

Les pompes à chaleur étant installées dans le grenier, elles doivent être posées sur un cadre de base (profilés en double T) pour un transfert de poids de grande superficie afin d'assurer la statique (voir schéma 96). Ce cadre de base peut être posé directement dans le grenier existant.

Les mesures structurelles comprennent donc :

- Nettoyage, déconnexion et dépollution du réservoir de fioul
- Rénovation du compartiment du réservoir et création d'une embrasure de porte dans le compartiment du réservoir
- « Ouvrir » la structure du toit
- Réallocation des chevrons de combles par le charpentier
- Pose et montage de supports statiques pour l'installation de pompes à chaleur
- Pose et montage des pompes à chaleur
- Remise à neuf de la toiture avec la mise en place des conduits de ventilation
- Renforcement du raccordement électrique (jusqu'à 100 A) vu que le raccordement a plus de 60 ans, un remplacement pour cause de vétusté peut s'appliquer, les travaux sur le domaine privé doivent être à la charge du propriétaire, plus de 2 250 CHF à titre de contribution unique aux frais de réseau (voir annexe 3)
- Les tableaux électriques contenant de l'amiante doivent être remplacés

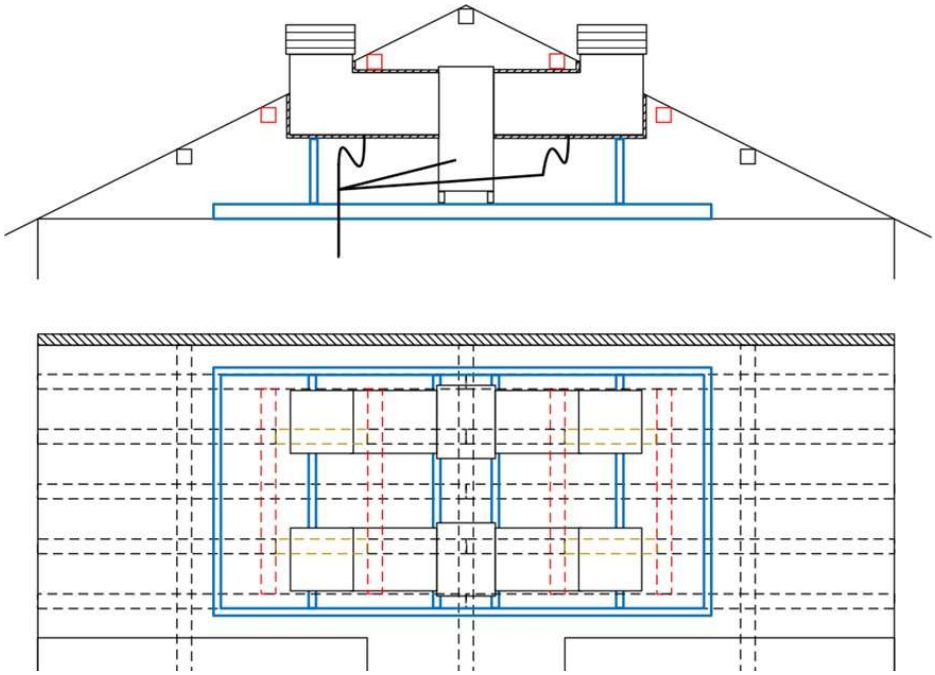


Schéma 96 : Renforcement du grenier, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 3

10.1.4.6 Fonctionnement du système

Le système de pompe à chaleur est conçu de sorte qu'après la rénovation complète du bâtiment, il peut couvrir le besoin de puissance de chauffage jusqu'à une température ambiante de -9 °C en mode monovalent. Jusqu'au moment de la rénovation complète, le support de la chaudière au fioul prévue sera nécessaire à des températures ambiantes inférieures à -5 °C. Le coefficient de performance annuel calculé pour le fonctionnement du chauffage des pompes à chaleur avant la rénovation complète du bâtiment JAZH est de 2,49. Le coefficient de performance annuel a été calculé en tenant compte de la distribution de fréquence horaire de la température ambiante à Zurich et de la courbe de chauffe conformément au chapitre 10.1.1.3 (VL/RL 60/47 °C @ A-10°C).

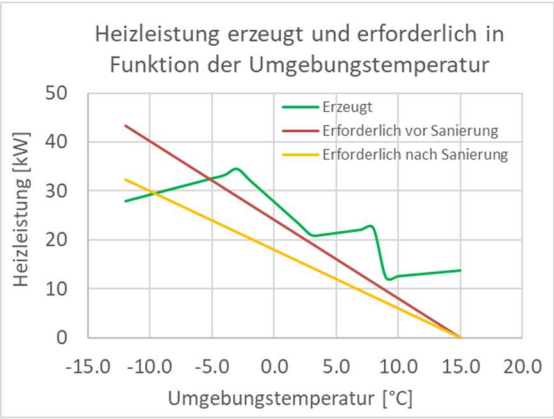


Schéma 97 : Aperçu de la puissance de chauffage requise dans la rue Hofwiesenstrasse 126 et de la puissance de chauffage générée par la ou les pompes à chaleur, solution 3

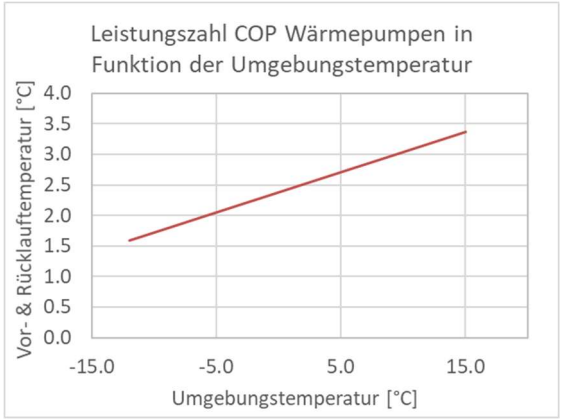


Schéma 98 : Comportement du coefficient de performance (COP) à température ambiante, Hofwiesenstrasse 126, solution 3

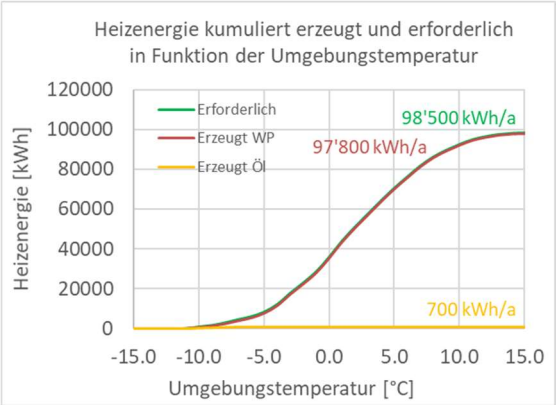


Schéma 99 : Énergie de chauffage annuelle dans la rue Hofwiesenstrasse 126, cumulée en fonction de la température extérieure, solution 3

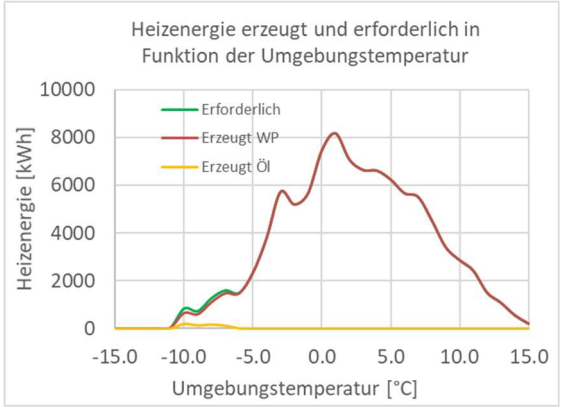


Schéma 100 : Énergie de chauffage annuelle dans la rue Hofwiesenstrasse 126, en fonction de la température extérieure, solution 3

10.1.4.7 Synthèse des coûts

Le résumé suivant présente les coûts d'investissement nécessaires et les coûts annuels qui en résultent. Le fonctionnement avant la rénovation a été pris en compte, y compris le fonctionnement de la chaudière au fioul. Les coûts d'exploitation et d'investissement d'un système supplémentaire de production d'eau chaude n'ont pas été pris en compte. Il faut également mentionner que les coûts de rénovation de la distribution d'eau chaude n'ont pas été pris en compte. Les calculs sont basés sur les offres indicatives obtenues.

Coûts d'investissement

Les coûts indiqués correspondent au stade de l'étude de faisabilité (+/- 25 %) et sont valables s'ils sont mis en œuvre dans la ville de Zurich. Les coûts d'investissement totaux d'après les offres obtenues s'élèvent à 181 000 CHF +/- 25 % (voir tableau 16).

Tableau 16 : Récapitulatif des coûts d'investissement, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 3

Poste	Coût HT avec étude de faisabilité +/- 25 % [CHF]	Durée d'utilisation [a]	Coûts de maintenance [%]
1. Travaux préliminaires			
1.1 Travaux sur la toiture : réallocation des chevrons de combles, créations d'ouvertures sur le toit, pose d'une nouvelle toiture, étanchéité et traversées, incluant le matériel et les travaux	15 100	30	0
2. Technique/source de chaleur			
2.1 Conduits de ventilation : conduites de ventilation insonorisés et capots d'isolation acoustique, incluant les travaux	16 600	20	1
3. Approvisionnement énergétique	1 200	30	2
3.1 Réservoir de fioul : nouveau réservoir en plastique	400	30	2
3.2 Production du fioul			
4. Production de chaleur	10 000	20	3

4.1 Chaudière : chaudière au fioul Tobler SK20 4.2 Pompe à chaleur : 2 unités Glen Dimplex LI 24 TES	10 000 34 800	20 20	3 4
4.3 Intégration hydraulique de la production de chaleur : pompes, vannes de commutation, séparateur hydraulique, divers accessoires de tuyauteries, travaux, postes de 2 à 5	17 400	20	1
4.4 Accumulateur de chaleur : réservoir d'accumulation, chauffage, incluant les accessoires de tuyauteries	2 000	20	1
4.5 Isolation : isolation des canalisations et accessoires de tuyauteries	4 800	30	0
5. Cheminée			
5.1 Cheminée : matériel de cheminée	600	20	3
6. Distribution de chaleur			
6.1 Distributeur de chauffage : pompes, mitigeurs, divers accessoires de tuyauteries, travaux	3 500	30	1
6.2 Extension : groupe d'extension et de sécurité, incluant divers accessoires de tuyauteries, travaux	4 100	20	1
9. Sanitaire			
9.1 Ballon d'eau chaude	0	20	3
9.2 Distributeur	0	40	2
9.3 Isolations	0	30	0
15. Technique du système de mesurage, de commande, de régulation et de contrôle			
15.1 Appareils de terrain : régulateurs et capteurs pour les pompes à chaleur et des chaudières	1 800	15	2
15.2 Mise en service : mise en service des pompes à chaleur et des chaudières au fioul par les techniciens de service	4 100	15	0
16. Électricité			
16.1 Démontage : travaux et élimination	1 000	15	0
16.2 Câblage : matériel électrique et travaux	15 000	20	1
16.3 Extension de la ligne d'alimentation/de l'alimentation : travaux du Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz) et contribution aux coûts de réseau	3 000	20	1
17. Travaux annexes			
17,1 Travaux de démolition : dépollution du système de chauffage existant, incluant les travaux et les frais	1 100	20	0
17.2 Grue/pose : pose de la pompe à chaleur	1 800	20	0
17.3 Rénovation du compartiment du réservoir : nettoyage, déconnexion, démontage et dépollution du réservoir de fioul, création de l'embrasure de la porte et des portes	7 600	20	0
17.4 Tranchées de câbles, extension de la ligne d'alimentation : travaux de creusement, pose de conduites vides et carottage, incluant le matériel compris	3 800	20	0
18. Honoraires			

18.1 Honoraires : ingénieur HLKKSE, ingénieur du génie civil, autorisations	31 300	20	0
Total des coûts d'investissement	***181 000***		

Coûts annuels

Les coûts annuels qui en résultent ont été déterminés en utilisant l'outil « Comparaison des variantes - Systèmes énergétiques » du Service de la construction de bâtiments de la ville de Zurich [18]. Les données sous-jacentes sont :

• Taux d'intérêt des calculs : 2,5 %

• Période d'observation : 15 ans

La période d'observation est pertinente par rapport à l'augmentation imputée des prix de l'énergie. Les augmentations de prix utilisées dans cette étude figurent à l'annexe 20. D'autres données de base, telles que les prix de l'énergie, se trouvent également à l'annexe 20. Les subventions qui peuvent être demandées dans le cadre des subventions de 2000 watts du Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz) sont énumérées à l'annexe 21. Les valeurs se rapportent au fonctionnement avant la rénovation complète (y compris le fonctionnement de la chaudière au fioul) et sans la production d'eau chaude supplémentaire requise par des chaudières avec une pompe à chaleur séparée.

Tableau 17 : Aperçu des coûts annuels, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 3

Désignation	Montant
Contributions de financement uniques – contributions de 2000 watts (Service d'électricité de la ville de Zurich – EWZ)	3 387 CHF
Coûts énergétiques annuels	11 170 CHF
Coûts de maintenance annuels	1 980 CHF
Coût annuel du capital hors subventions	11 280 CHF
Coûts d'investissement annuels **avec subventions**	11 070 CHF
Coûts annuels totaux hors subventions	24 430 CHF
Coûts annuels totaux **avec subventions**	24 220 CHF
Coûts de production de chaleur hors subventions	24,8 centimes/kWh
Coûts de production de chaleur **avec subventions**	**24,6 centimes/kWh**

10.1.5 Bilan de l'étude de projets, rue Hofwiesenstrasse 126

La comparaison des variantes présentées ci-dessous a été réalisée en utilisant l'outil « Comparaison des variantes des systèmes énergétiques version 2.2 » de l'Office des bâtiments de la ville de Zurich [18]. Le tableau 18 présente un résumé des valeurs clés les plus importantes des différentes solutions qui ont été soumises à une étude de projets type.

Tableau 18 : Récapitulatif des coûts en tenant compte des contributions de financement, rue Hofwiesenstrasse 126

	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Fioul
Coûts d'investissement en CHF Phase d'étude de faisabilité +/- 25 %	**178 000**	**137 000**	**181 000**	**53 000**
Coût annuel du capital en CHF	11 030	8 380	11 070	3 110
Frais de maintenance annuels en CHF	2 130	1 690	1 980	690
Coûts énergétiques annuels en CHF	11 170	10 540	11 170	9 740
Coûts annuels totaux en CHF	**24 330**	**20 610**	**24 220**	**13 540**
Besoin en énergie primaire en kWh/a	106 000	105 600	106 000	143 000
Énergie primaire non renouvelable en kWh/a	2 700	2 300	2 800	141 400
Émissions de gaz à effet de serre en kg/a	850	800	880	34 600
Pollution de l'environnement (UBP) en mille points/a	2 990	2 840	3 010	25 790
Coûts de production de la chaleur en centime/kWh	**24,7**	**20,9**	**24,6**	**13,7**

La ventilation des coûts de la variante au fioul est indiquée à l'annexe 8.

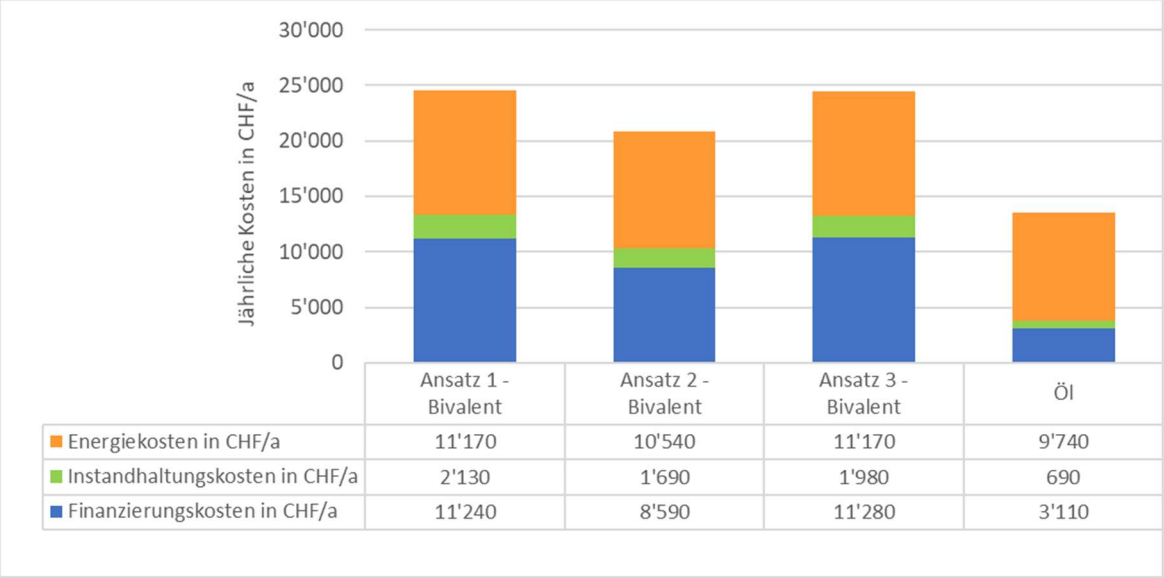
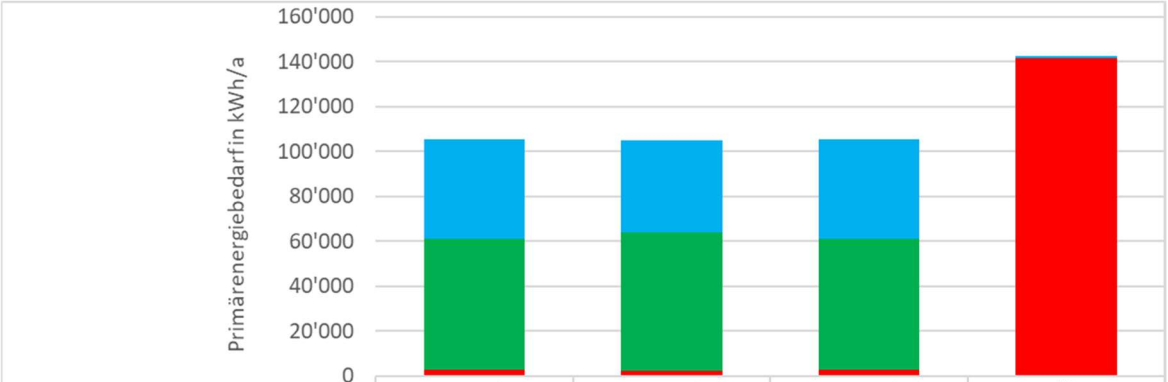


Schéma 101 : Comparaison des variantes, rue Hofwiesenstrasse 126, coûts annuels en tenant compte des subventions



	Ansatz 1 - Bivalent	Ansatz 2 - Bivalent	Ansatz 3 - Bivalent	Öl
Betrieb erneuerbar in kWh/a	44'120	40'768	44'095	1'159
Betrieb erneuerbar am Standort in kWh/a	58'560	61'740	58'526	0
Primärenergie nicht erneuerbar in kWh/a	2'700	2'300	2'800	141'400

Schéma 102 : Comparaison des variantes, rue Hofwiesenstrasse 126, besoin en énergie primaire

Les études de projets types menées montrent qu'une installation intérieure de pompes à chaleur air-eau au sous-sol peut être intéressante pour réaliser des pans de façade, à condition que les façades soient apparentes. Les coûts de mise en œuvre du système de chauffage avec des pompes à chaleur air-eau dans ces conditions peuvent être avantageux et même inférieurs à ceux de la mise en œuvre d'une solution avec des pompes à chaleur air-eau installées à l'extérieur. Cela s'explique notamment par les coûts relativement bas des mesures structurelles. À cet égard, les études de projets types montrent qu'une installation intérieure de pompes à chaleur air-eau est techniquement possible non seulement au sous-sol, mais aussi dans les combles du bâtiment.

Les études de projets types confirment que toutes les solutions envisagées peuvent être mises en œuvre à l'aide de pompes à chaleur standard. L'utilisation de pompes à chaleur spécifiques coûteuses peut ainsi être supprimée, ce qui a un effet positif sur les coûts d'investissement.

En fonction de la solution utilisée, les coûts de production de chaleur, en tenant compte des subventions éventuelles lors de l'utilisation des pompes à chaleur air-eau, sont compris entre 21 centimes/kWh et 25 centimes/kWh. En revanche, les coûts de production de chaleur qui en résultent en cas de remplacement d'un chauffage par des combustibles fossiles (nouvelle chaudière au fioul, remplacement individuel) sont de l'ordre de 14 centimes/kWh. Les coûts de production de chaleur les plus bas en cas d'utilisation de pompes à chaleur air-eau résultent de l'application de la solution 2 « installation intérieure au sous-sol ».

10.2 Rue Müllerstrasse 34

10.2.1 Situation

Vous trouverez plus de détails sur la rue Müllerstrasse 34 au chapitre 7.2. Dans ce chapitre, l'accent est mis sur les propriétés pertinentes pour l'étude de projets.

Schéma 103 : Vues, rue Müllerstrasse 34

10.2.1.1 Zonage

Le zonage et le niveau de sensibilité du bâtiment situé à Hofwiesenstrasse 126 sont les suivants :

- Zone : zone de conservation de quartiers 5a
- Niveau de sensibilité : III

Le bâtiment étant situé dans la zone de conservation de quartiers 5a, les réglementations augmentent concernant les interventions sur la conception à l'extérieur du bâtiment, ce qui complique l'installation d'une pompe à chaleur, par ex. sur le toit. Le niveau de sensibilité III ne nécessite aucune exigence particulière quant aux émissions sonores.

10.2.1.2 Conditions spatiales

Le bien immobilier situé à Müllerstrasse 34 ne propose aucune transition qui pourrait être utilisée. Il est important de mentionner, s'agissant de ce bien immobilier, que la production de chaleur est actuellement décentralisée et, en cas de centralisation, le système de distribution de chaleur doit être rénové dans son intégralité. Le bâtiment offre un espace au sous-sol, où un système de pompe à chaleur pourrait être installé. Il y a aussi des corniches accessibles, qui offrent de l'espace pour l'installation. Cependant, cela devrait rester accessible aux résidents. Le principal défi ici est de pouvoir respecter les règles de zonage.

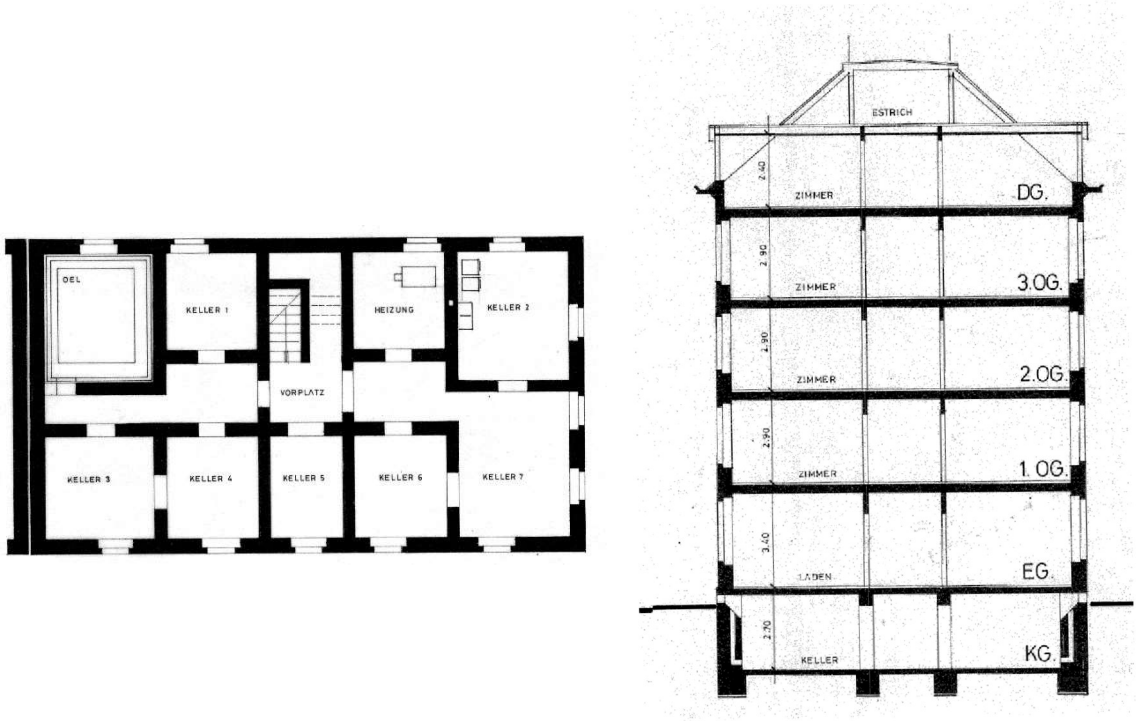


Schéma 104 : Vues en coupe, rue Müllerstrasse 34 (source : Liegenschaft Stadt Zürich)

10.2.1.3 Puissance de chauffage requise et courbe de chauffage

Compte tenu du fait que les locaux situés à Müllerstrasse 34 sont chauffés de manière décentralisée et qu'aucune facturation des frais de chauffage central n'est donc accessible, il convient de faire une estimation des besoins en énergie de chauffage et des besoins en énergie pour la production d'eau chaude. Une valeur moyenne de 130 kWh/m²a est calculée pour le besoin en énergie de chauffage. Les besoins en eau chaude sont supposés être de 50 l par personne et par jour (avec ΔT = 50 K). L'évolution qui en résulte de la puissance de chauffage en fonction de la température ambiante et des courbes de chauffage associées figure au schéma 105.

Tableau 19 : Besoin en énergie de chauffage, rue Müllerstrasse 34 (hypothèses actuelles)

Poste	Besoin annuel en énergie
Chauffage	141 600 kWh/a (1089 m², 130 kWh/m² x a)
Eau chaude	32 000 kWh/a (30 personnes)
Total chauffage et pompe à chaleur eau-eau	173 600 kWh/a

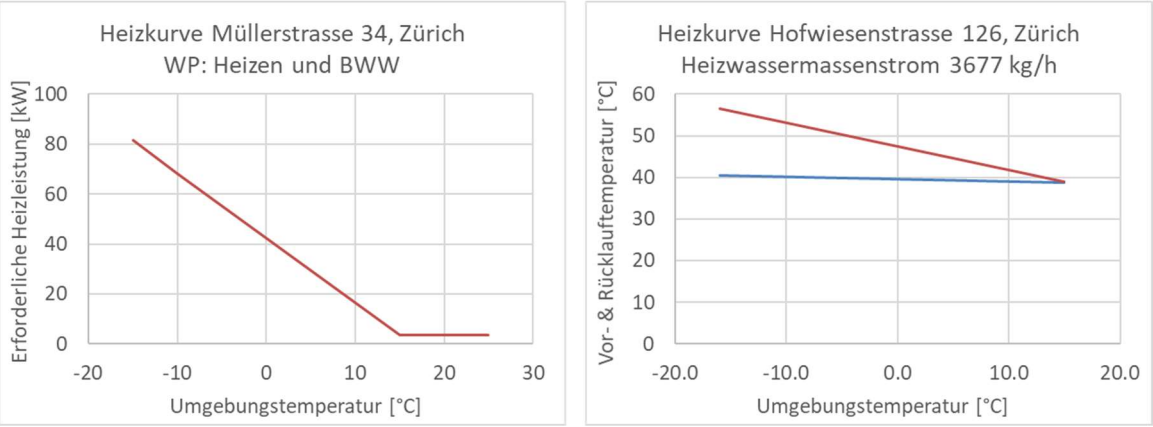


Schéma 105 : Puissance de chauffage et températures de départ/retour requises, hypothèse actuelle en cas d'installation du système de dissipation de chaleur

Les concepts de fonctionnement suivants ont été examinés avec ces hypothèses. Les performances de dimensionnement de la pompe à chaleur ou le mode de fonctionnement de la pompe à chaleur varient (monovalent vs bivalent). Les influences sur la consommation électrique maximale estimée de la pompe à chaleur, sur la part qui en résulte d'énergie thermique renouvelable et la part d'énergie thermique produite par le gaz ont été évaluées. Les éventuels temps de blocage des pompes à chaleur par l'entreprise d'approvisionnement en énergie n'ont pas été pris en compte. Un modèle tarifaire correspondant doit être convenu avec le fournisseur d'énergie.

Tableau 20 : Dimensionnement de la puissance de chauffage de la pompe à chaleur air-eau, rue Müllerstrasse 34

Puissance de chauffage de la pompe à chaleur @ A-8/W55 [%]	Part de la puissance de la pompe à chaleur dans la puissance de crête @ A-8 [kW]	Puissance de crête la chaudière au gaz [%]	Part de gaz dans l'énergie de chauffage [%]	Part de l'énergie de chauffage non renouvelable (Électricité : gestion mixte de la ville de Zurich) [%]	Consommation d'énergie maximale approximative de la pompe à chaleur [A]
63 kW (2-3 pompes à chaleur)	***100***	***0***	***0***	***2***	***93***
45 kW (2 pompes à chaleur)	72	18	2	4	65
30 kW (1-2 pompes à chaleur)	48	33	10	12	42

Fonctionnement monovalent

- Si un fonctionnement monovalent de la pompe à chaleur est souhaité, le système de pompe à chaleur optimal doit avoir les caractéristiques suivantes :
- Puissance de chauffage requise @ A-8/W55 : 66 kW
- Température de départ requise : > 60 °C
- Efficacité : coefficient de performance (COP) idéal @ A-7/W55 > 1,8
- Puissance acoustique : < 60 dB (A) (idéalement < 55 dB (A))
- Mode de fonctionnement : monovalent

Fonctionnement bivalent parallèle

Si d'un point de vue judicieux sur le plan technique et économique (ce bien immobilier est examiné de plus près avec les solutions envisagées) un concept de fonctionnement bivalent parallèle de la pompe à chaleur air-eau est visé, le système de pompe à chaleur optimal doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Puissance de chauffage requise @ A-8/W55 : 30 kW
- Température de départ requise : > 60 °C
- Efficacité : coefficient de performance (COP) idéal @ A-7/W55 > 1,8
- Puissance acoustique : < 60 dB (A) (idéalement < 55 dB (A))
- Mode de fonctionnement : bivalent parallèle

Dans ce contexte, la chaudière au gaz doit être dimensionnée comme suit :

- Puissance de chauffage requise @ A-8/W55 : 33 kW
- Séparateur hydraulique intégré

10.2.1.4 Raccordement électrique

L'alimentation électrique du bâtiment situé à Müllerstrasse 34 permet actuellement une consommation électrique de 100 A/400 VAC. La protection par fusibles du distributeur principal est de 80 A, mais elle peut être remplacée par 100 A sans aucun effort. Il en résulte une réserve d'achat d'énergie de 34,65 kW (cf. annexes 9 et 10). Pour le fonctionnement d'une pompe à chaleur, en fonction de son mode de fonctionnement et de sa conception, il peut s'avérer nécessaire de rénover ou d'étendre l'alimentation électrique.

10.2.1.5 Étude de projets sur les solutions adaptées

Les solutions suivantes peuvent être déterminées en utilisant la matrice des variantes :

- Solution 2 - installation intérieure au sous-sol
- Solution 4 - installation extérieure sur une toiture split (pompe à chaleur spécifique)
- Solution 5 - installation extérieure compacte sur le toit

Schéma 106 : Matrice des variantes, rue Müllerstrasse 34

Plusieurs passages avec la matrice sont effectués afin d'obtenir des solutions adaptées. La puissance de chauffage requise pour ce bien immobilier étant très élevée pour les systèmes de pompe à chaleur standard, seul le concept de fonctionnement bivalent est pris en compte pour des raisons d'espace avec la solution 2. Les deux concepts de fonctionnement pour les solutions 4 et 5 (bivalente/monovalente, sommaire des solutions voir schéma 107). Lors de la rénovation, il faut tenir compte du fait que toute la technologie du bâtiment doit être rénovée (distribution de chauffage, système de dissipation de chaleur, production d'eau chaude centralisée, distribution d'eau chaude).

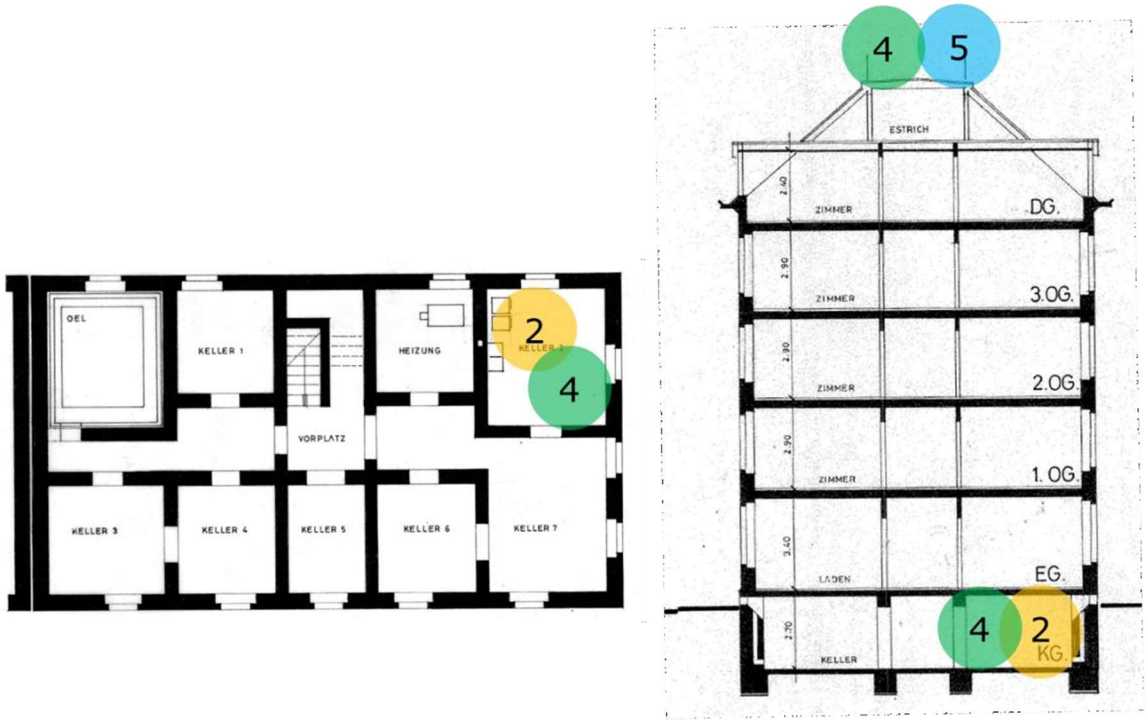


Schéma 107 : Sommaire des solutions, rue Müllerstrasse 34

10.2.2 Étude de projets, solution 2 – installation au sous-sol – bivalent

Les études de projets types menées ont montré qu'un fonctionnement monovalent des pompes à chaleur n'est pas possible lorsqu'il est mis en œuvre d'après la solution 2 en raison de l'espace disponible au sous-sol. C'est pourquoi la mise en œuvre d'après la solution 2 est prévue exclusivement pour le mode de fonctionnement bivalent des pompes à chaleur.

10.2.2.1 Mode de fonctionnement et dimensionnement de la puissance de chauffage de la pompe à chaleur

Dans la mesure où un concept de fonctionnement bivalent est envisagé, la pompe à chaleur air-eau LW380 (1 unité) d'Alpha Innotec doit être utilisée pour l'installation au sous-sol (puissance de chauffage requise conformément au paragraphe 10.2.1.3).

- Capacité de chauffage @ A-8/W50 : 32 kW
- Température de départ maximale : 50 °C @ A-10
- Efficacité : COP @ A-7/W50 2,2, COP @ A2/W35 3,9
- Puissance acoustique : 58 dB (A)
- Protection par fusibles : 40 A (« lente »)
- Courant de démarrage : 52 A
- Réfrigérant : R404A (GWP ~ 3920)
- Poids : 505 kg
- Dimensions : LxHxP 0,8x1,9x1,3 m

Schéma 108 : Pompe à chaleur air-eau Alpha Innotec (source : Alpha Innotec AG)

La chaudière au gaz murale Junkers Cerapur 9000iW 40 doit être utilisée pour couvrir les pics de demande de chauffage à basse température ambiante.

- Capacité de chauffage : 4,9-40 kW
- Protection par fusibles : monophasée 6 A (« lente »)
- Niveau de puissance acoustique : 51 dB (A)
- Poids : 148 kg
- Dimensions : LxHxP 0,6x0,7x0,4 mm

Schéma 109 : Chaudière à gaz murale Junkers (source : www.junkers.com)

10.2.2.2 Installation de la pompe à chaleur

La pompe à chaleur est installée au sous-sol. Les ouvertures du puits de sortie d'air nécessaires à cet effet, l'installation de la chaudière à gaz et le câblage sont visibles dans les schémas ci-dessous.

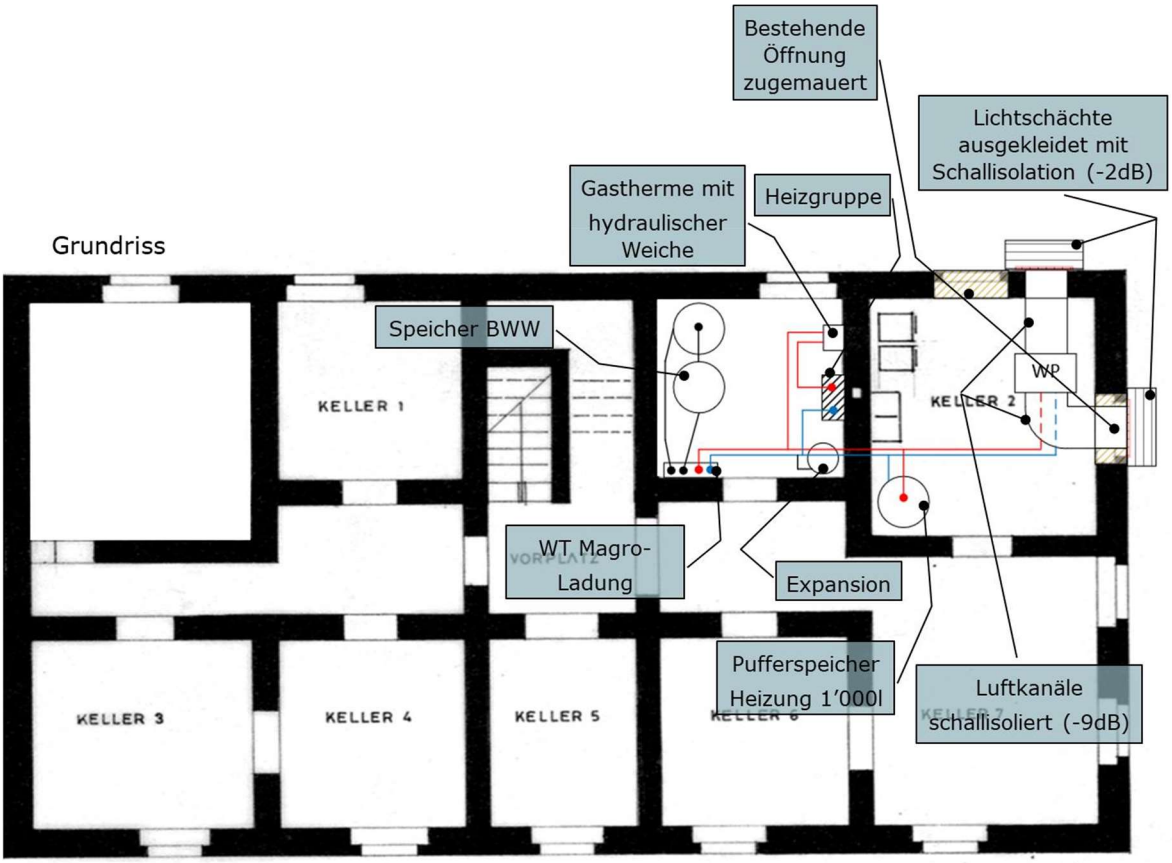


Schéma 110 : Plan sommaire du sous-sol, rue Müllerstrasse 34, solution 2 mode bivalent

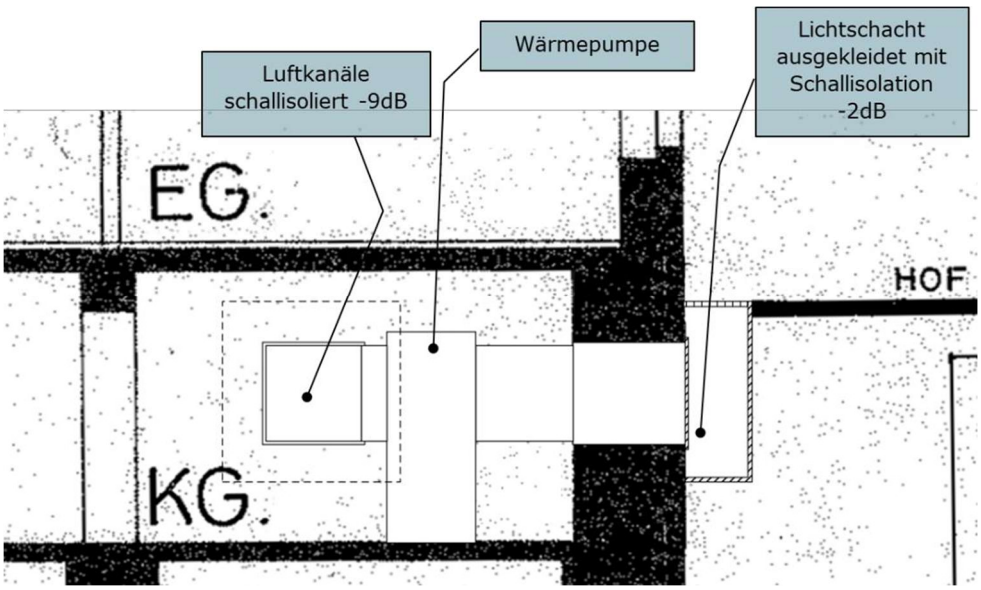


Schéma 111 : Vue sommaire, rue Müllerstrasse 34, solution 2 mode bivalent

Schéma 112 : Visualisation 3D, rue Müllerstrasse 34, solution 2 mode bivalent

10.2.2.3 Preuve de la protection contre le bruit

En basant sur la définition que le point de réception 1 correspond à la fenêtre du 1er étage, l'étude de projets est susceptible d'obtenir une autorisation (évaluation des émissions sonores d'après la ville de Zurich [17]). Si la fenêtre la plus proche du rez-de-chaussée est considérée, l'autorisation n'est pas accordée.

- Niveau de puissance acoustique : 58 dB (A)
- Niveau de sensibilité : III (50 dB (A))
- Point de réception 1 : propre bâtiment
- Installation : pompe à chaleur dans le bâtiment (+6 dB)
- Correction de niveau K1 : fonctionnement de nuit +10 dB
- Correction de niveau K2 : à peine audible + 2 dB
- Correction de niveau K3 : à peine audible + 2 dB
- Protection contre le bruit : gaine d'isolation phonique -9 dB
- Protection contre le bruit : revêtement du puits de lumière -2 dB
- Niveau d'évaluation du point de réception 1 : 46 dB (A)

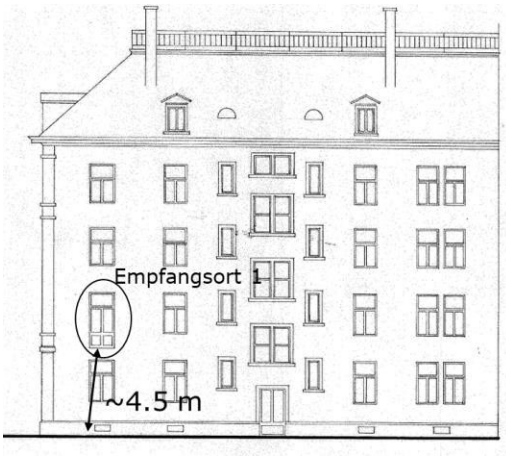


Schéma 113 : Preuve de la protection contre le bruit, Müllerstrasse 34, solution 2 mode bivalent

Une installation de la pompe à chaleur au point de réception 1 est considérée comme **susceptible d'obtenir une autorisation**.

10.2.2.4 Intégration hydraulique et concept de réglage

Parallèlement à la pompe à chaleur, la chaudière au gaz est intégrée via un séparateur hydraulique. De plus, l'eau chaude peut être produite à l'aide d'un échangeur de chaleur à plaques, qui est intégré parallèlement au réservoir d'accumulation (voir schéma 114 et annexe 11).

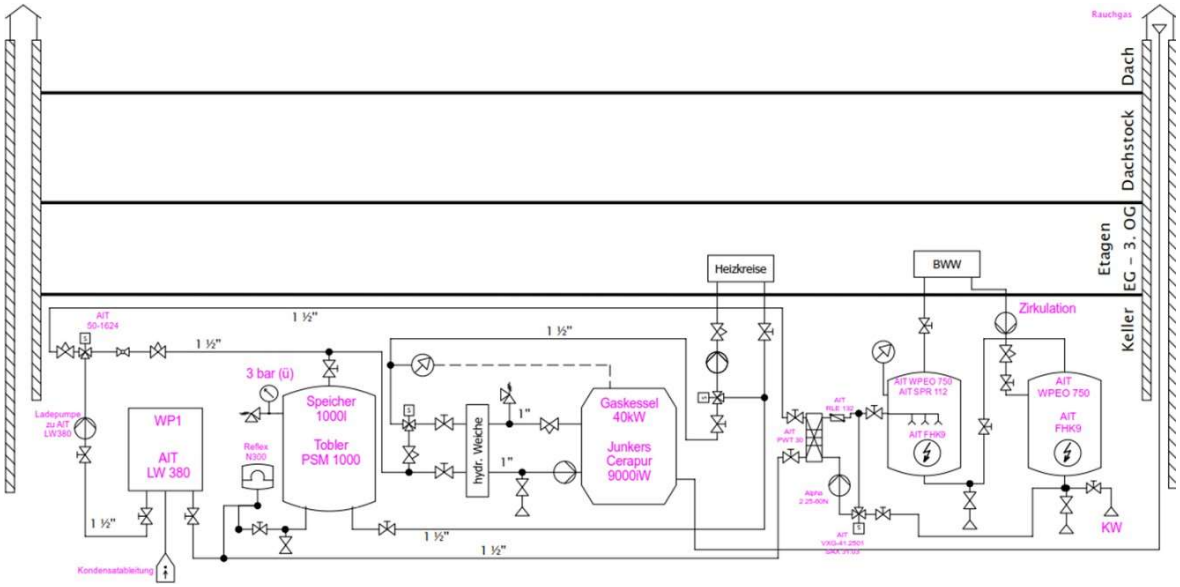


Schéma 114 : Intégration hydraulique, rue Müllerstrasse 34, solution 2 mode bivalent

10.2.2.5 Mesures structurelles

La mise en œuvre du projet nécessite diverses mesures :

- Création de puits de lumière
- Création de traversées murales pour l'installation des conduits de ventilation
- Création d'un socle pour l'installation de la pompe à chaleur
- Pose et montage de la pompe à chaleur
- Montage des conduits de ventilation
- Adaptations de la cheminée pour la chaudière à gaz de combustion
- Remplacement du fusible client pour 100 A (déjà commandé, mais actuellement 80 A)

10.2.2.6 Fonctionnement du système

La pompe à chaleur Alpha Innotec à deux niveaux prévus est capable de couvrir complètement les besoins en puissance de chauffage du bâtiment jusqu'à une température ambiante minimale d'environ 1,5 °C. Dans la plage de 1,5 °C à 7 °C, la pompe à chaleur utilise les deux niveaux de puissance disponibles pour régler la puissance de chauffage générée (voir schéma 115). À des températures ambiantes inférieures à 1,5 °C, la chaudière au gaz fonctionne en parallèle avec la pompe à chaleur. Il en résulte les chiffres de performance annuels suivants.

- Coefficient de performance annuel pour le chauffage JAZH : 2,86
- Coefficient de performance annuel pour la pompe à chaleur eau-eau JAZBWW : 3,00
- Coefficient de performance annuel pour le chauffage et la pompe à chaleur eau-eau JAZges : 2,89

Le calcul des facteurs de performance annuels a été réalisé en tenant compte de la courbe de chauffage d'après le paragraphe 10.2.1.3.

Les schémas suivants ne montrent que le mode de chauffage. On peut ainsi voir sur le schéma 117 que l'énergie de chauffage cumulée requise annuellement s'élève à 141 600 kWh/an.

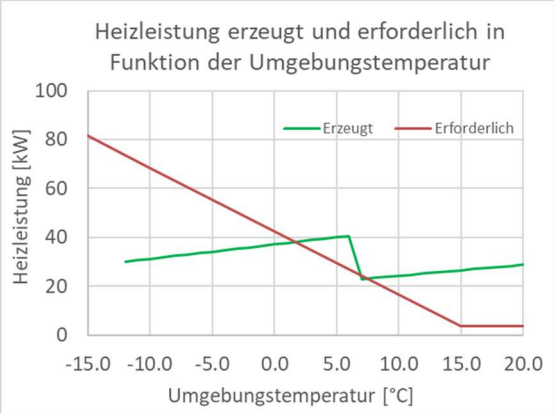


Schéma 115 : Aperçu de la puissance de chauffage requise dans la rue Müllerstrasse 34 et de la puissance de chauffage générée par la pompe à chaleur, solution 2 mode bivalent

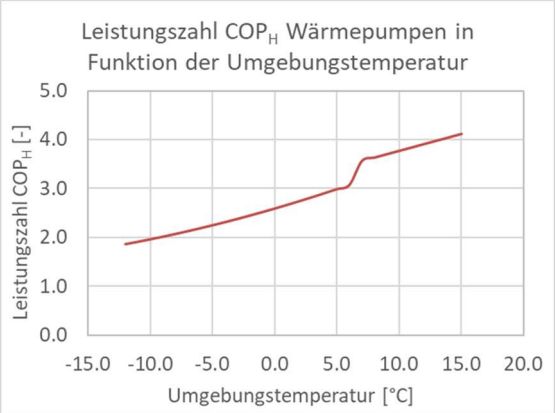


Schéma 116 : Comportement du coefficient de performance (COP) à température ambiante, rue Müllerstrasse 34, solution 2 mode bivalent

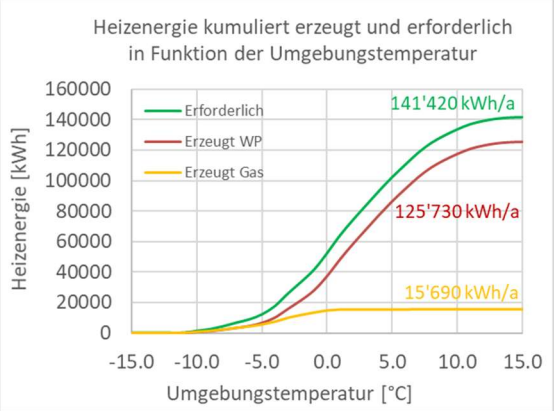


Schéma 117 : Énergie de chauffage annuelle, rue Müllerstrasse 34, cumulée en fonction de la température extérieure, solution 2 mode bivalent

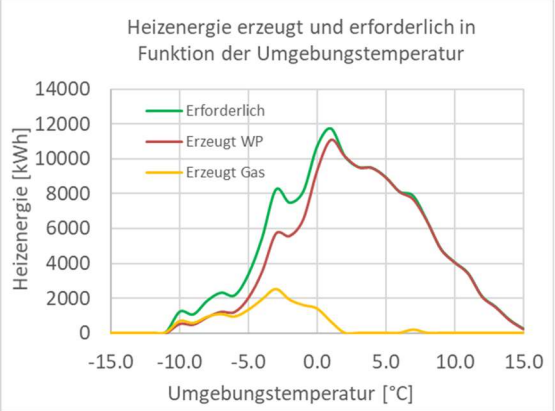


Schéma 118 : Énergie de chauffage annuelle, rue Müllerstrasse 34, en fonction de la température extérieure, solution 2 mode bivalent

10.2.2.7 Synthèse des coûts

Les postes des coûts les plus importants sont résumés dans les tableaux ci-dessous en fonction des coûts d'investissement et des coûts annuels. Il convient de mentionner que les coûts de rénovation du système de distribution et de dissipation du chauffage et de distribution d'eau chaude n'ont pas été pris en compte.

Coûts d'investissement

Les coûts indiqués correspondent au stade de l'étude de faisabilité (+/- 25 %) et sont valables s'ils sont mis en œuvre dans la ville de Zurich. Les coûts d'investissement totaux d'après les offres obtenues s'élèvent à 152 000 CHF +/- 25 % (voir tableau 21).

Tableau 21 : Récapitulatif des coûts d'investissement, rue Müllerstrasse 34, solution 2 mode bivalent

Poste	Coûts HT - Phase d'étude de faisabilité +/- 25 % [CHF]	Durée d'utilisation [a]	Coûts de maintenance [%]
1. Travaux préliminaires			
1.1 Création des puits de lumière : mesures structurelles, incluant le matériel et les travaux	3 400	30	0
1.2 Traversées murales, conduits de ventilation : création de nouvelles traversées murales et fermeture des traversées existantes incluant le matériel et les travaux	5 000	30	0
2. Technique/source de chaleur			
2.1 Conduits de ventilation : conduits de ventilation insonorisés et puits de lumière à isolation phonique, incluant les travaux	16 400	20	0,5
3. Approvisionnement énergétique			
3.1 Canalisation d'alimentation de gaz : adaptations de la canalisation d'alimentation de gaz, incluant le matériel et les travaux	800	30	2
3.2 Protection par fusibles pour le gaz : accessoires de tuyauteries	100	30	1,5
4. Production de chaleur			
4.1 Chaudière : chaudière au gaz Junkers Cerapur 9000 iW 45 23	5 800	20	2,5
4.2 Pompe à chaleur : AIT LW 380	30 500	20	3,5
4.3 Intégration hydraulique de la production de chaleur : pompes, vannes de commutation, séparateur hydraulique, divers accessoires de tuyauteries, travaux, postes 2 à 5	13 800	20	0,5
4.4 Accumulateur de chaleur : réservoir d'accumulation, chauffage, incluant les accessoires de tuyauteries	2 000	20	0,5
4.5 Isolation : isolation des canalisations et accessoires de tuyauteries	4 700	30	0
5. Cheminée			
5.1 Cheminée : matériel de cheminée	1 200	20	2,5

6. Distribution de chaleur			
6.1 Distributeur de chauffage : pompes, mitigeurs, divers accessoires de tuyauteries, travaux	3 900	30	1
6.2 Extension : groupe d'extension et de sécurité, incluant divers accessoires de tuyauterie, travaux	3 800	20	1
9. Sanitaire			
9.1 Ballon d'eau chaude : réservoir de pompe à chaleur eau-eau avec chargement Magro, incluant les pompes, vannes, divers accessoires de tuyauteries et travaux	14 900	20	2,5
9.2 Distributeur : distribution de la pompe à chaleur eau-eau, incluant le matériel et les travaux	1 500	40	1,5
9.3 Isolation : isolation des canalisations et accessoires de tuyauteries, incluant le matériel et les travaux	700	30	0
15. Technique du système de mesurage, de commande, de régulation et de contrôle			
15.1 Appareils de terrain : régulateurs et capteurs, pompes à chaleur et chaudières au gaz	200	15	1,5
15.2 Mise en service : mise en service des pompes à chaleur et des chaudières au gaz par des techniciens de service	3 200	15	0
16. Électricité			
16.1 Démontage : travaux et élimination	1 000	15	0
16.2 Câblage : matériel électrique et travaux	8 800	20	1
17. Travaux annexes			
17,1 Travaux de démolition : élimination du système de chauffage existant, incluant les travaux et les frais	1 100	20	0
17.2 Grue/pose : pose de la pompe à chaleur	800	20	0
17.3 Local d'installation : socle d'installation de la pompe à chaleur	1 800	20	0
18. Honoraires			
18.1 Honoraires : ingénieur HLKKSE, ingénieur en génie civil, autorisations	26 600	20	0
Total des coûts d'investissement	***152 000***		

Coûts annuels

Les coûts annuels qui en résultent ont été déterminés en utilisant l'outil « Comparaison des variantes - Systèmes énergétiques » du Service de la construction de bâtiments de la ville de Zurich [18]. Les données sous-jacentes sont :

- Taux d'intérêt des calculs : 2,5 %
- Période d'observation : 15 ans

La période d'observation est pertinente par rapport à l'augmentation imputée des prix de l'énergie. Les augmentations de prix utilisées dans cette étude figurent à l'annexe 20. D'autres données de base, telles que les prix de l'énergie, se trouvent également à l'annexe 20. Les subventions qui peuvent être demandées dans le cadre des subventions de 2000 watts du Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz) sont énumérées à l'annexe 21.

Tableau 22 : Aperçu des coûts annuels, rue Müllerstrasse 34, solution 2 mode bivalent

Désignation	Montant
Contributions de financement uniques – contributions de 2000 watts (Service d'électricité de la ville de Zurich – EWZ)	10 304 CHF
Coûts énergétiques annuels	16 110 CHF
Coûts de maintenance annuels	1 990 CHF
Coût annuel du capital hors subventions	9 440 CHF
Coûts d'investissement annuels **avec subventions**	8 800 CHF
Coûts annuels totaux hors subventions	27 540 CHF
Coûts annuels totaux **avec subventions**	26 900 CHF
Coûts de production de chaleur hors subventions	15,9 centimes/kWh
Coûts de production de chaleur **avec subventions**	**15,5 centimes/kWh**

10.2.3 Étude de projets, solution 4 – installation extérieure sur le toit – version split – mode bivalent

10.2.3.1 Fonctionnement et dimensionnement de la puissance de chauffage de la pompe à chaleur

Une pompe à chaleur spécifique est nécessaire pour pouvoir mettre en œuvre le concept de fonctionnement bivalent, avec une installation extérieure sur une toiture split. L'appareil WP-AWS-1-1-S3-PB-38-FU de Viessmann AG est conforme aux spécifications requises (cf. chapitre 10.2.1.3) :

- Puissance de chauffage @ A-8/W35 : 38 kW
- Température de départ maximale : 65 °C @ A-7
- Efficacité : COP @ A-7/W35 3,1
- Puissance acoustique à l'extérieur : 50 dB (A)
- Protection par fusibles : 63 A (« lente »)
- Réfrigérant : R134a (GWP ~ 1430)
- Courant de démarrage : < 73 A
- Dimensions :
  LxHxP 1,8x2,0x1,0 m (intérieur)
  LxHxP 2,2x1,4x4,7 m (extérieur)

Schéma 119 : Unité externe spécifique, pompe à chaleur air-eau de Viessmann (source : Viessmann AG)

La chaudière au gaz murale de Junkers (Cerapur 9000iW 40) mentionnée dans le chapitre précédent permet de couvrir les pics de demande :

- Puissance de chauffage : 4,9-40 kW
- Protection par fusibles : monophasée 6 A (« lente »)
- Niveau de puissance acoustique : 51 dB (A)
- Poids : 148 kg
- Dimensions : LxHxP 0,6x0,7x0,4 m

Schéma 120 : Chaudière au gaz murale Junkers (source : www.junkers.com)

10.2.3.2 Installation de la pompe à chaleur

Les schémas ci-dessous montrent comment la pompe à chaleur spécifique Viessmann est intégrée dans la rue Müllerstrasse 34. Il s'agit d'une part de l'aéroréfrigérant de l'appareil split sur le toit et d'autre part de l'appareil intérieur au sous-sol. Les vues à l'échelle réelle illustrent l'espace et la visibilité requis.

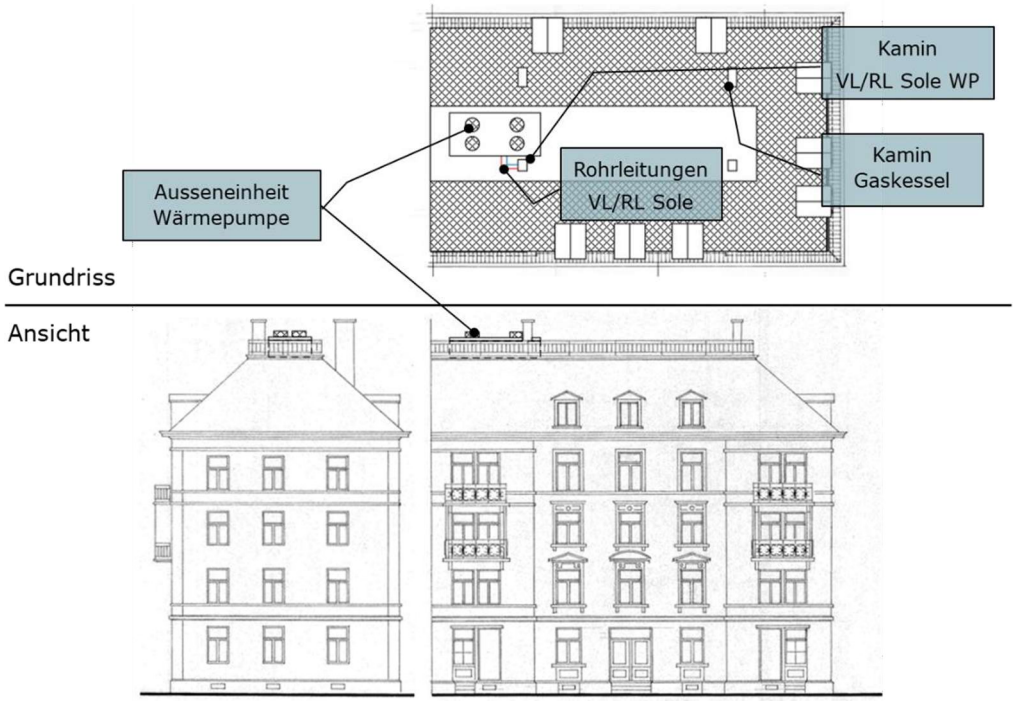


Schéma 121 : Vues extérieures, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode bivalent

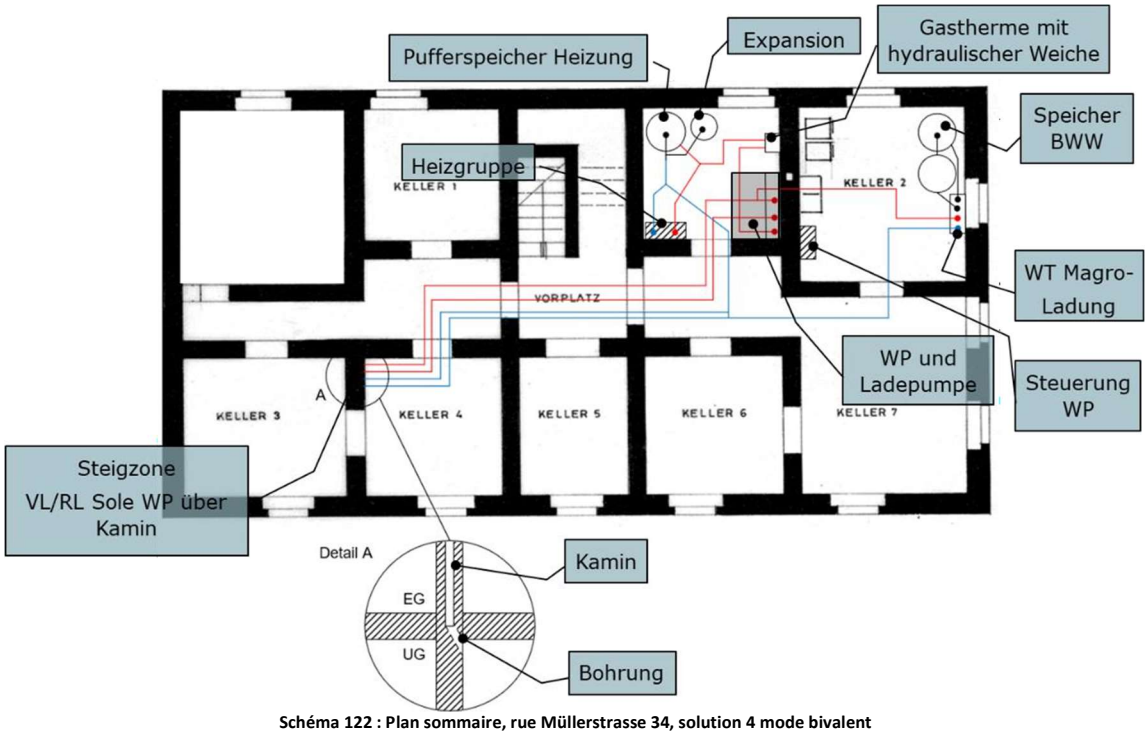


Schéma 122 : Plan sommaire, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode bivalent

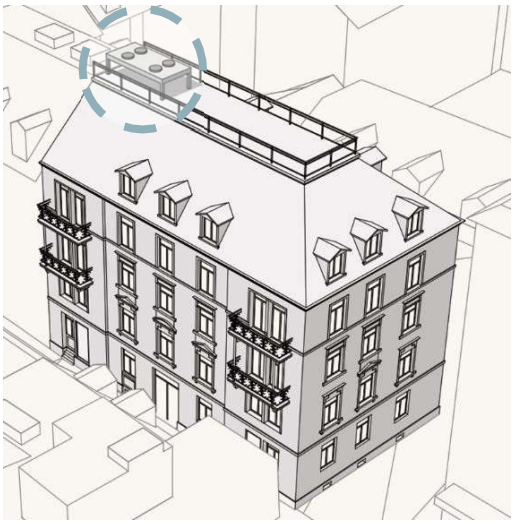


Schéma 123 : Visualisation 3D, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode bivalent

10.2.3.3 Preuve de la protection contre le bruit

L'examen de la preuve de la protection contre le bruit [17] montre que le projet est susceptible d'obtenir une autorisation avec le niveau d'évaluation déterminé au point de réception le plus proche.

- Niveau de puissance acoustique : 50 dB (A)
- Niveau de sensibilité : III (50 dB (A))
- Point de réception 1 : fenêtre la plus proche
- Installation : pompe à chaleur sur pieds (+3 dB)
- Correction de niveau K1 : fonctionnement de nuit +10 dB
- Correction de niveau K2 : à peine audible + 2 dB
- Correction de niveau K3 : à peine audible + 0 dB
- Niveau d'évaluation du point de réception 1 : 41 dB (A)

Une installation extérieure avec cette pompe à chaleur air-eau en version split est **susceptible d'obtenir une autorisation**.

Empfangsort : Point de réception
WP : Pompe à chaleur

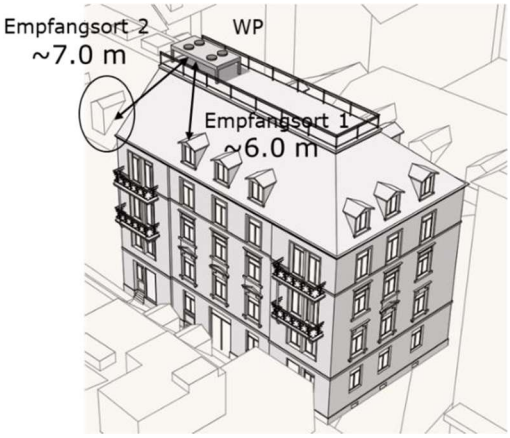


Schéma 124 : Preuve de la protection contre le bruit, Müllerstrasse 34, solution 4 mode bivalent

10.2.3.4 Intégration hydraulique et concept de réglage

L'intégration hydraulique est similaire à celle du paragraphe 10.2.2.4, sauf qu'au lieu d'une pompe à chaleur compacte, l'unité interne de l'appareil split se trouve au sous-sol. L'unité extérieure sur le toit est reliée à l'unité intérieure au sous-sol via des conduites hydrauliques et nécessite donc une extension supplémentaire comme un groupe de sécurité (voir schéma 125 : Intégration hydraulique, rue Müllerstrasse 34, solution 4, mode bivalent : ou annexe descriptive 12).

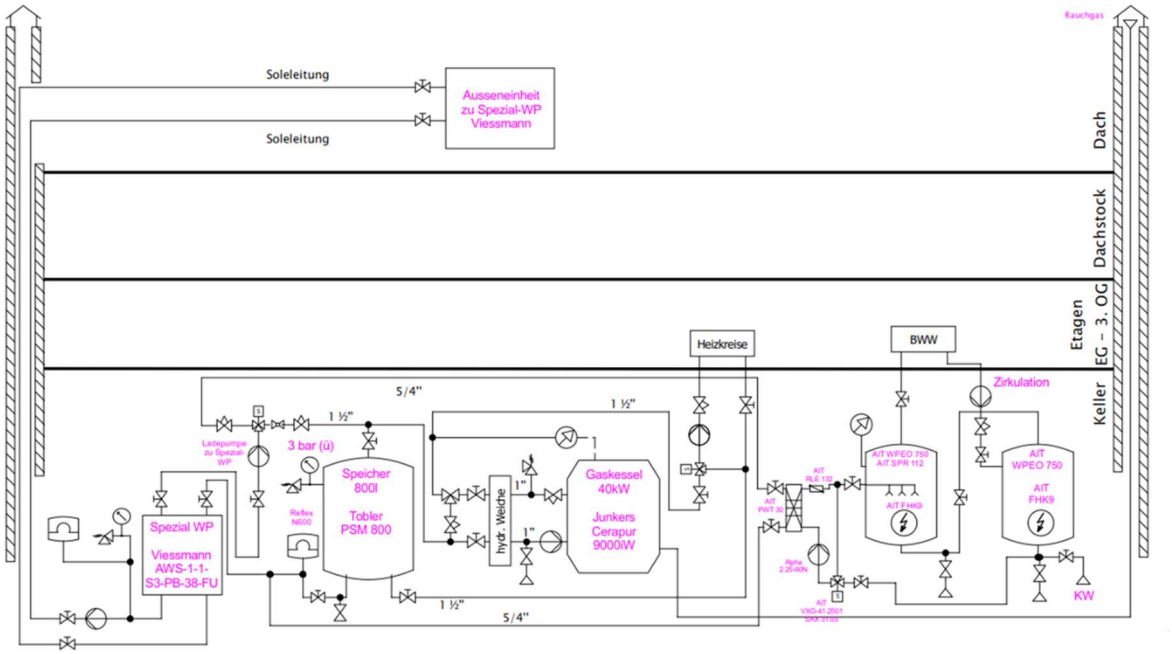


Schéma 125 : Intégration hydraulique, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode bivalent

10.2.3.5 Mesures structurelles

Diverses mesures structurelles doivent être prises pour mettre en œuvre le projet. Elles comprennent :

- Démontage et élimination des systèmes de chauffage existants
- Adaptation structurelle des cheminées pour une utilisation à titre de colonnes montantes. Pompes à chaleur, liaisons hydrauliques VL/RL
- Mesures structurelles sur la structure du toit pour améliorer la statique dans la zone d'installation des pompes à chaleur – construction d'une poutre en acier dans le grenier (voir schéma 126, en bleue)
- Pose et montage du support d'installation pour l'unité extérieure des pompes à chaleur
- Pose et montage des pompes à chaleur (unités extérieure et intérieure)
- L'alimentation électrique doit être renforcée (125A), les coûts des travaux, tels que les la redevance du réseau, sont exigibles.

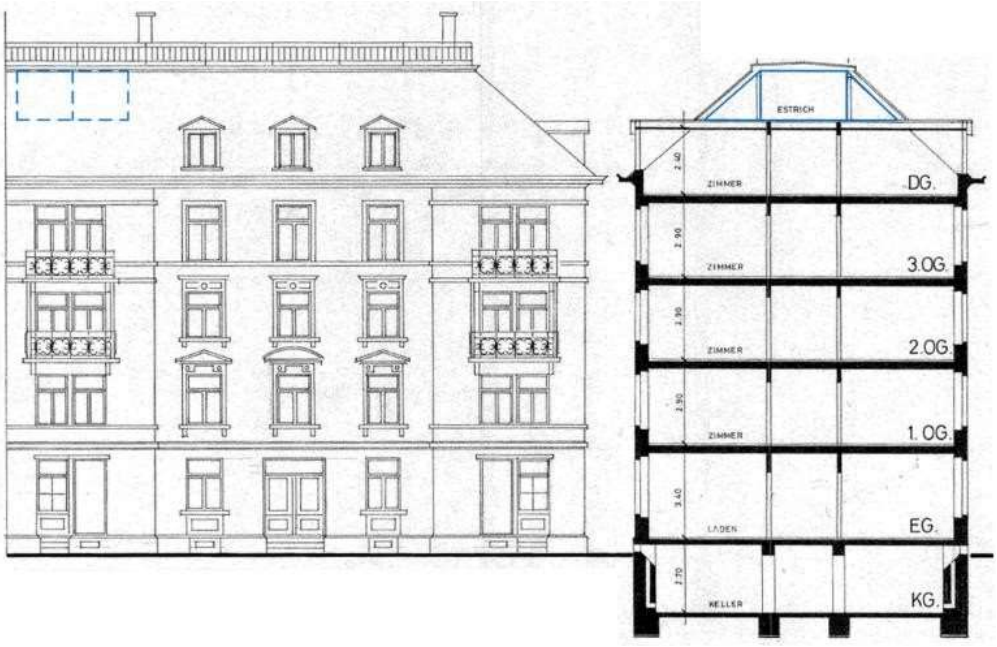


Schéma 126 : Renforcement de la structure du toit, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode bivalent

10.2.3.6 Fonctionnement du système

Les schémas ci-dessous montrent le fonctionnement du système de pompe à chaleur en fonction de la température ambiante. Les courbes de la puissance de chauffage générée par les pompes à chaleur et le coefficient de performance en mode chauffage COPH sont affichées. Afin que l'efficacité du système puisse être évaluée et comparée, les performances annuelles correspondantes ont été calculées :

- Coefficient de performance annuel pour le chauffage JAZH : 3,62
- Coefficient de performance pour la pompe à chaleur eau-eau JAZBWW : 3,00
- Coefficient de performance annuel pour le chauffage et la pompe à chaleur eau-eau JAZges : 3,48

Le calcul tient compte de la distribution de fréquence horaire de la température ambiante à Zurich ainsi que de la courbe de chauffage déterminée au paragraphe 10.2.1.3.

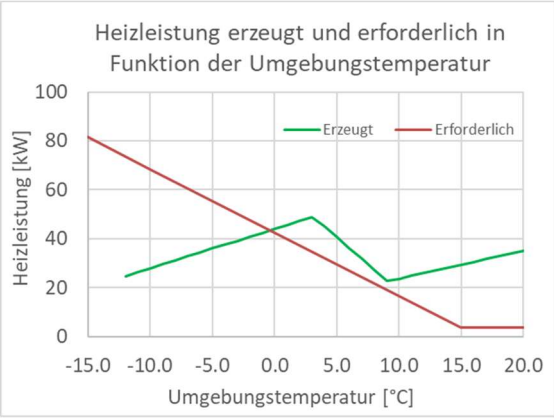


Schéma 127 : Aperçu de la puissance de chauffage requise, rue Müllerstrasse 34 et de la puissance de chauffage générée par la pompe à chaleur, solution 4 mode bivalent

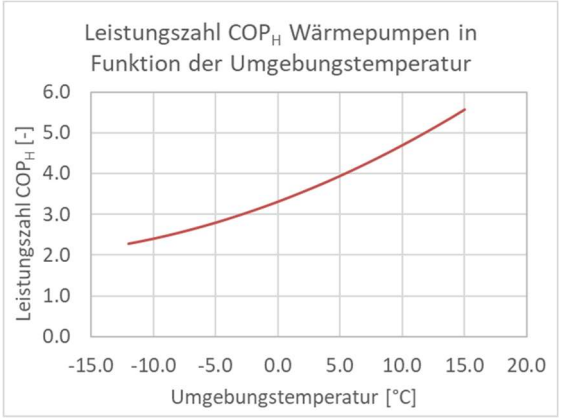


Schéma 128 : Comportement du coefficient de performance (COP) à température ambiante, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode bivalent

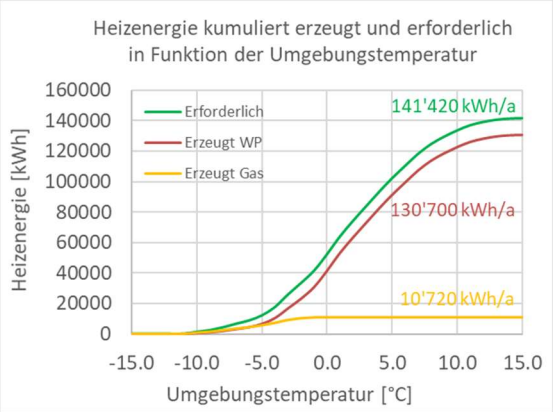


Schéma 129 : Énergie de chauffage annuelle, rue Müllerstrasse 34, cumulée en fonction de la température extérieure, solution 4 mode bivalent

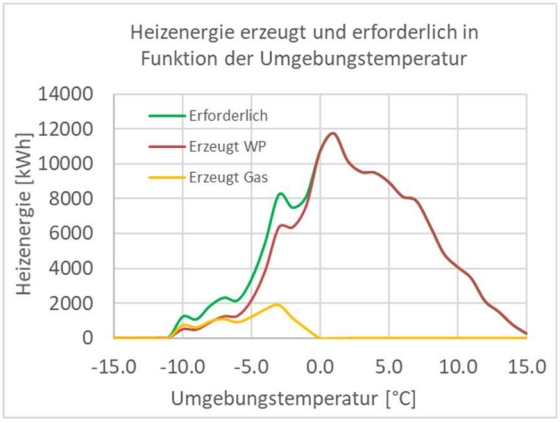


Schéma 130 : Énergie de chauffage annuelle, rue Müllerstrasse 34, en fonction de la température extérieure, solution 4 mode bivalent

10.2.3.7 Synthèse des coûts

Les coûts d'investissement et les coûts annuels qui en résultent sont résumés ci-dessous. Il convient de mentionner ici que les coûts de rénovation du système de distribution et de dissipation de chauffage et de distribution d'eau chaude n'ont pas été pris en compte.

Coûts d'investissement

Les coûts indiqués correspondent au stade de l'étude de faisabilité (+/- 25 %) et sont valables s'ils sont mis en œuvre dans la ville de Zurich. Les frais d'investissement totaux d'après les offres obtenues s'élèvent à 235 600 CHF +/- 25 % (voir tableau 23).

Tableau 23 : Récapitulatif des coûts d'investissement, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode bivalent

Poste	Frais HT Phase d'étude de faisabilité +/- 25 % [CHF]	Durée d'utilisation [a]	Frais de maintenance [%]
1. Travaux préliminaires			
1.2 Mesures statiques pour le toit : renforcement du grenier à l'aide de poutres en acier, incluant le matériel et les travaux	30 000	30	0
2. Technique/source de chaleur			
2.1 Puissances connectées : puissances connectées pour les pompes à chaleur à l'extérieur, incluant le matériel et les travaux	6 200	20	1
3. Approvisionnement énergétique			
3.1 Canalisation d'alimentation de gaz : adaptations de la canalisation d'alimentation de gaz, incluant le matériel et les travaux	800	30	2
3.2 Protection par fusibles pour le gaz : accessoires de tuyauterie	100	30	2
4. Production de chaleur			
4.1 Chaudière : chaudière au gaz Junkers Cerapur 9000 iW 45 23	5 800	20	3

4.2 Pompe à chaleur : Viessmann WP-AW-1-1-S3-PB-38-FU	73 500	20	4
4.3 Intégration hydraulique de la production de chaleur : pompes, vannes de commutation, séparateur hydraulique, divers accessoires de tuyauteries, travaux, postes 2 à 5	19 700	20	1
4.4 Accumulateur de chaleur : réservoir d'accumulation, chauffage, incluant les accessoires de tuyauteries	2 000	30	1
4.5 Isolation : isolation des canalisations et accessoires de tuyauteries	5 500	30	0
5. Cheminée			
5.1 Cheminée : matériel de cheminée	1 200	20	3
6. Distribution de chaleur			
6.1 Distributeur de chauffage : pompes, mitigeurs, divers accessoires de tuyauteries, travaux	4 200	30	1
6.2 Expansion : Groupe d'expansion et de sécurité comprenant divers raccords, travaux	5 100	20	1
9. Sanitaire			
9.1 Ballon d'eau chaude : réservoir de la pompe à chaleur eau-eau avec chargement Magro, incluant comprenant les pompes, vannes, divers accessoires de tuyauteries et travaux	14 200	20	3
9.2 Distributeur : distribution de la pompe à chaleur eau-eau, incluant le matériel et les travaux	2 100	40	2
9.3 Isolation : isolation des canalisations et accessoires de tuyauteries, incluant le matériel et les travaux	700	30	0
15. Technique du système de mesurage, de commande, de régulation et de contrôle			
15.1 Appareils de terrain : régulateurs et capteurs, pompes à chaleur et chaudières à gaz	200	15	2
15.2 Mise en service : mise en service des pompes à chaleur et des chaudières au gaz par des techniciens de service	5 000	15	0
16. Électricité			
16.1 Démontage : travaux et élimination	1 000	15	0
16.2 Câblage : matériel électrique et travaux	11 300	20	1
17. Travaux annexes			
17.1 Travaux de démolition : élimination du système de chauffage existant, incluant les travaux et les frais	1 100	20	0
17.2 Grue/pose : pose de la pompe à chaleur	1 800	20	0
17.3 Travaux de toiture : création de percées, incluant le matériel et les travaux	5 800	20	0
18. Honoraires			
18.1 Honoraires : ingénieur HLKKSE, ingénieur en génie civil, autorisations	38 300	20	0
Total des coûts d'investissement	***235 600***		

Coûts annuels

Les coûts annuels qui en résultent ont été déterminés en utilisant l'outil « Comparaison des variantes - Systèmes énergétiques » du Service de la construction de bâtiments de la ville de Zurich [18]. Les données sous-jacentes sont :

- Taux d'intérêt des calculs : 2,5 %
- Période d'observation : 15 ans

La période d'observation est pertinente par rapport à l'augmentation imputée des prix de l'énergie. Les augmentations de prix utilisées dans cette étude figurent à l'annexe 20. D'autres données de base, telles que les prix de l'énergie, se trouvent également à l'annexe 20. Les subventions qui peuvent être demandées dans le cadre des subventions de 2000 watts du Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz) sont énumérées à l'annexe 21.

Tableau 24 : Aperçu des coûts annuels, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode bivalent

Désignation	Montant
Contributions de financement uniques - contributions de 2000 watts EWZ	10 304 CHF
Coûts énergétiques annuels	14 260 CHF
Coûts de maintenance annuels	3 500 CHF
Coût annuel du capital hors subventions	14 450 CHF
Coûts d'investissement annuels **avec subventions**	13 820 CHF
Coûts annuels totaux hors subventions	32 210 CHF
Coûts annuels totaux **avec subventions**	31 580 CHF
Coûts de production de chaleur hors subventions	18,6 centimes/kWh
Coûts de production de chaleur **avec subventions**	**18,2 centimes/kWh**

10.2.4 Étude de projets, solution 4 – installation extérieure sur le toit – version split – mode monovalent

10.2.4.1 Fonctionnement et dimensionnement de la puissance de chauffage de la pompe à chaleur

Le concept monovalent dans la rue Müllerstrasse 34, en version split sur le toit, peut être mis en œuvre avec une pompe à chaleur air-eau spécifique de Viessmann. Les spécifications du système WP-AW-2-1-S3-PB-75-FU, régulé via son propre système de régulation, sont les suivantes :

- Puissance de chauffage @ A-8/W35 : 75 kW
- Température de départ maximale : 65 °C @ A-7
- Efficacité : COP @ A-7/W35 3,1
- Puissance acoustique à l'extérieur : 58 dB (A)
- Protection par fusible : 2 x 63 A
- Réfrigérant : R134a (GWP ~ 1430)
- Courant de démarrage : < 70 A
- Dimensions :

  LxHxP 2,2x2,0x1,0 m (intérieur)

  LxHxP 2,2x1,4x4,7 m (extérieur)

Schéma 131 : Unité extérieure spécifique, pompe à chaleur air-eau de Viessmann (source : Viessmann AG)

10.2.4.2 Installation de la pompe à chaleur

L'intégration de la pompe à chaleur spécifique de Viessmann à Müllerstrasse 34 est illustrée dans les différentes vues ci-dessous. Il s'agit d'une part de l'aéroréfrigérant de l'appareil split sur le toit et d'autre part de l'appareil intérieur au sous-sol. Les vues à l'échelle réelle illustrent l'espace et la visibilité requis.

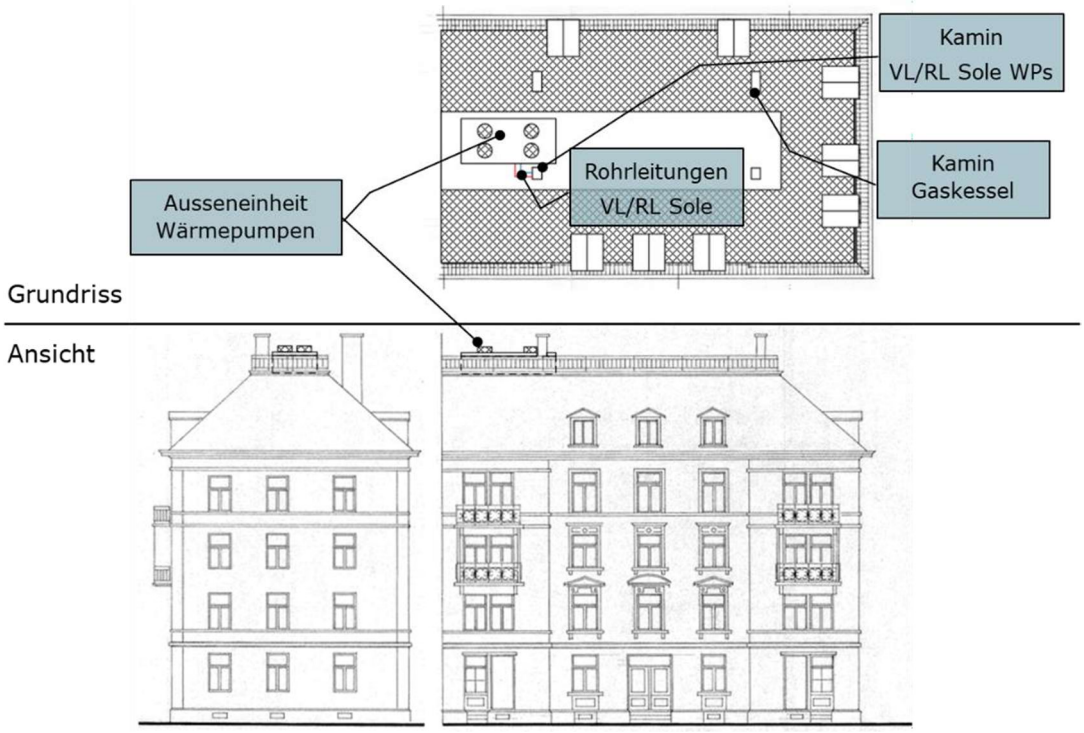


Schéma 132 : Vues extérieures, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode monovalent

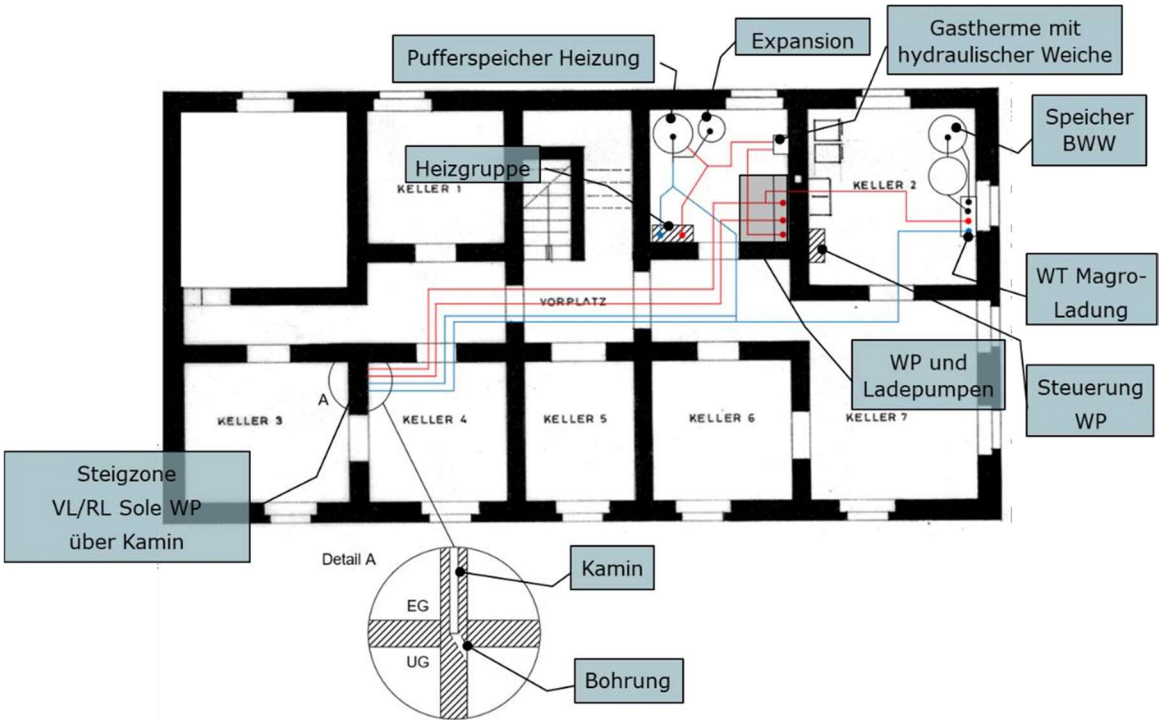


Schéma 133 : Plan sommaire, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode monovalent

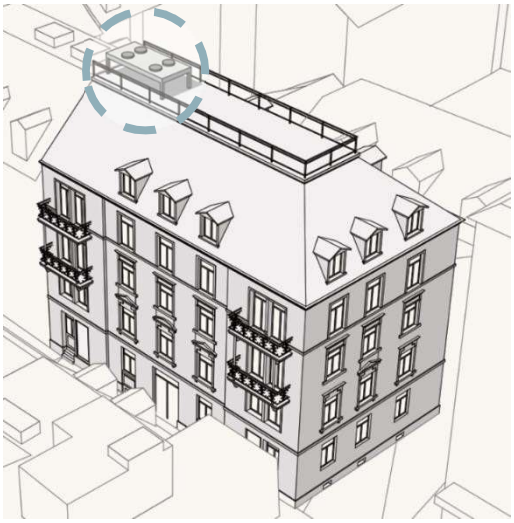


Schéma 134 : Visualisation 3D, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode monovalent

10.2.4.3 Preuve de la protection contre le bruit

Le système de pompe à chaleur utilisé peut satisfaire la preuve de la protection contre le bruit avec celui du point de réception le plus proche 1 (voir schéma 135) et le projet est donc susceptible d'obtenir une autorisation (cf. source [17]).

- Niveau de puissance acoustique : 58 dB (A)
- Niveau de sensibilité : III (50 dB (A))
- Point de réception 1 : bâtiment voisin
- Installation : pompe à chaleur sur pieds (+3 dB)
- Correction de niveau K1 : fonctionnement de nuit +10 dB
- Correction de niveau K2 : à peine audible + 2 dB
- Correction de niveau K3 : inaudible + 0 dB
- Niveau d'évaluation du point de réception 1 : 49 dB (A)

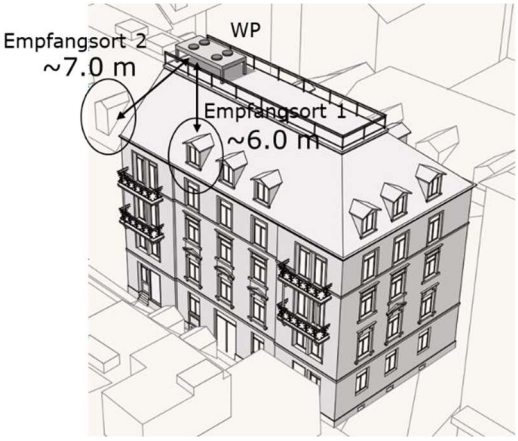


Schéma 135 : Preuve de la protection contre le bruit, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode monovalent

Une installation extérieure avec la pompe à chaleur air-eau spécifique est **susceptible d'obtenir une autorisation**.

10.2.4.4 Intégration hydraulique et concept de réglage

L'intégration hydraulique correspond à celle du chapitre 10.2.3.4, mais à titre de concept monovalent et donc sans système de production de chaleur supplémentaire (par exemple chaudière au gaz). L'unité extérieure sur le toit est connectée à l'unité intérieure au sous-sol via des conduites hydrauliques et le groupe de sécurité correspondant (voir schéma 136 et annexe 13).

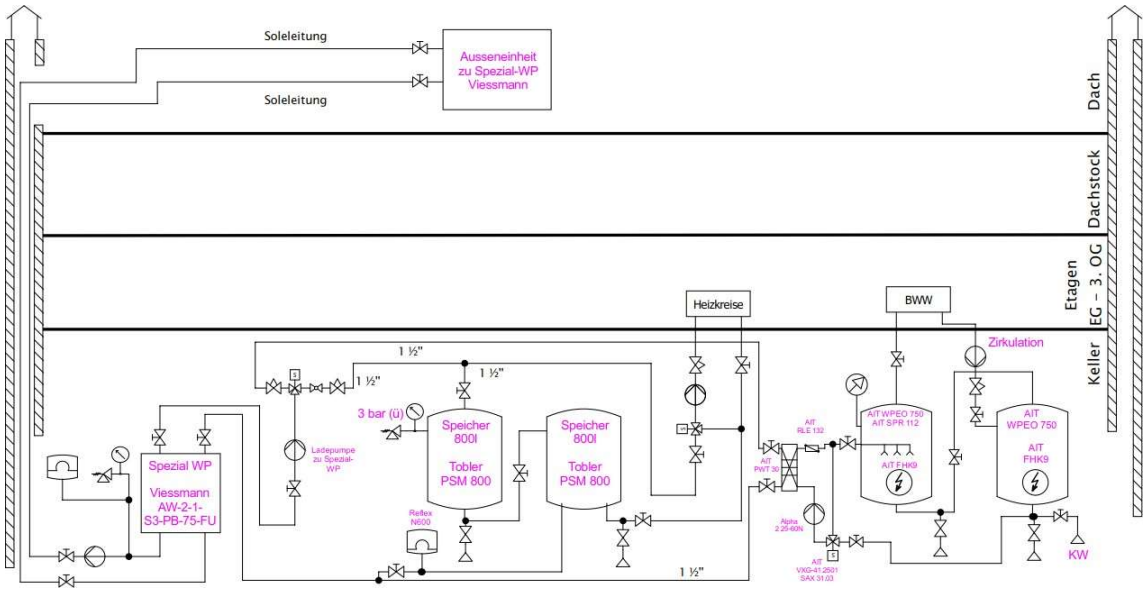


Schéma 136 : Intégration hydraulique, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode monovalent

10.2.4.5 Mesures structurelles

Les points suivants doivent être respectés lors de la mise en œuvre :

- Démontage et élimination des systèmes de chauffage existants
- Travaux de creusement pour agrandir l'alimentation électrique
- Extension de l'alimentation via le Service d'électricité de la ville de Zurich
- Adaptation structurelle des cheminées pour une utilisation à titre de colonnes montantes. Pompes à chaleur, liaisons hydrauliques VL/RL
- Mesures structurelles sur la structure du toit pour améliorer la statique dans la zone d'installation des pompes à chaleur – construction de poutres en acier dans le grenier (voir schéma 137)
- Pose et montage du support d'installation pour l'unité extérieure des pompes à chaleur
- Pose et montage de pompes à chaleur (unités extérieures et unités intérieures)
- Renforcement de l'alimentation électrique (creusement des canalisations et raccordement, remplacement des fusibles principaux)

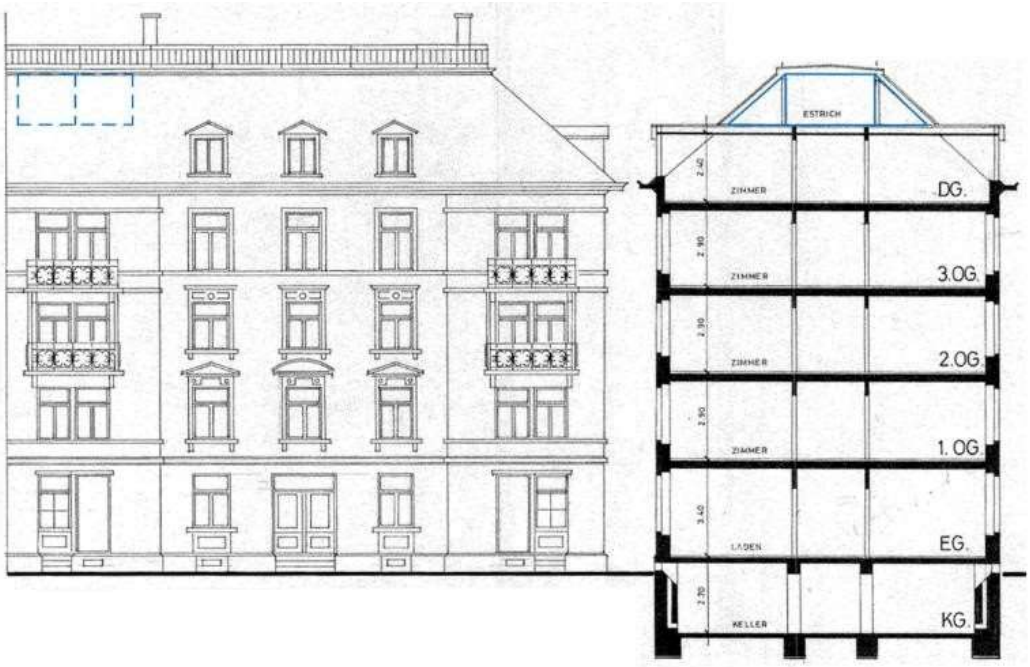


Schéma 137 : Renforcement de la structure du toit, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode monovalent

10.2.4.6 Fonctionnement du système

En tenant compte de la courbe de chauffage d'après le chapitre 10.2.1.3, les chiffres de fonctionnement annuels suivants du système de pompe à chaleur peuvent être calculés.

- Coefficient de performance annuel pour le chauffage JAZ_H : 3,54
- Coefficient de performance annuel pour la pompe à chaleur eau-eau JAZ_{BWW} : 3,00
- Coefficient de performance annuel pour le chauffage et la pompe à chaleur eau-eau JAZ_{ge} : 3,43

Le système de pompe à chaleur à régulation de puissance peut couvrir la puissance de chauffage requise à chaque point de fonctionnement en mode monovalent.

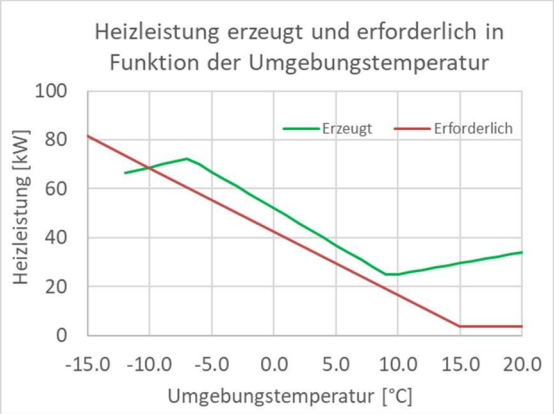


Schéma 138 : Aperçu de la puissance de chauffage nécessaire, rue Müllerstrasse 34 et de la puissance de chauffage générée par la pompe à chaleur, solution 4 mode monovalent

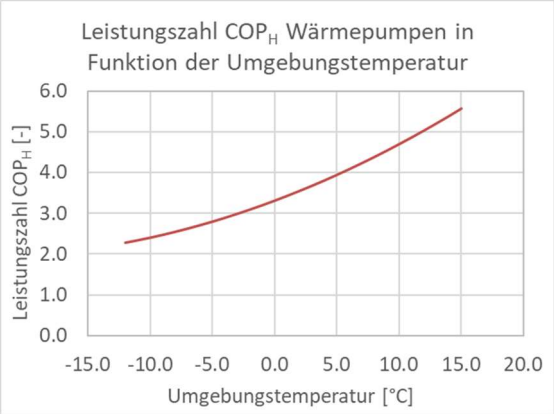


Schéma 139 : Comportement du coefficient de performance (COP) à température ambiante, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode monovalent

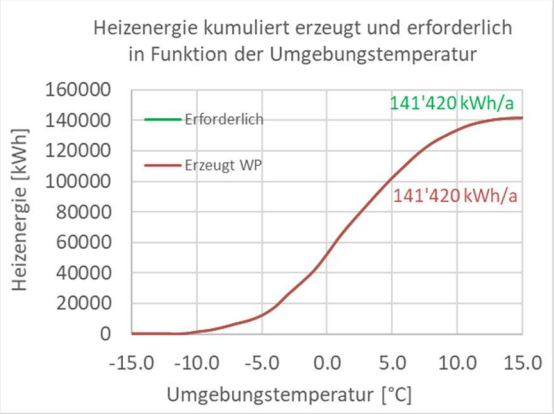


Schéma 140 : Énergie de chauffage annuelle, rue Müllerstrasse 34, cumulée en fonction de la température extérieure, solution 4 mode monovalent

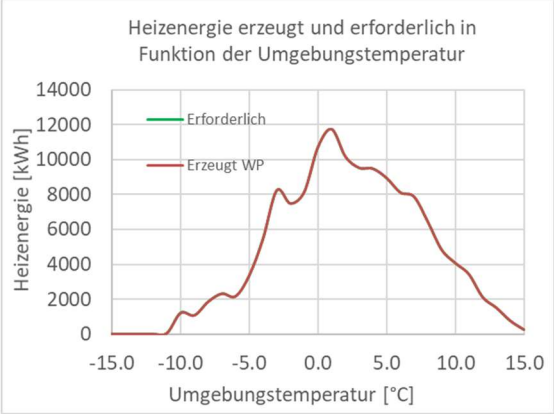


Schéma 141 : Énergie de chauffage annuelle, rue Müllerstrasse 34, en fonction de la température extérieure, solution 4 mode monovalent

10.2.4.7 Synthèse des coûts

Vous trouverez ci-dessous un aperçu les coûts d'investissement et les coûts annuels qui en résultent. Il convient de mentionner que les coûts de rénovation du système de distribution et de dissipation de chauffage et de distribution d'eau chaude n'ont pas été pris en compte.

Coûts d'investissement

Les coûts indiqués correspondent au stade de l'étude de faisabilité (+/- 25 %) et sont valables s'ils sont mis en œuvre dans la ville de Zurich. Les frais d'investissement totaux d'après les offres obtenues s'élèvent à 308 200 CHF +/- 25 % (voir tableau 25). Vous trouverez ci-dessous un aperçu des coûts d'investissement et des coûts annuels qui en résultent. Il convient de mentionner que les coûts de rénovation du système de distribution et dissipation de chauffage et de distribution d'eau chaude n'ont pas été pris en compte.

Tableau 25 : Récapitulatif des coûts d'investissement, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode monovalent

Poste	Coûts HT - Phase d'étude de faisabilité [CHF]	Durée d'utilisation [a]	Frais de maintenance [%]
1. Travaux préliminaires			
1.2 Mesures statiques du toit : renforcement du grenier à l'aide de poutres en acier, incluant le matériel et les travaux	30 000	30	0
2. Technique/source de chaleur			
2.1 Câbles de raccordement : câbles de raccordement pour pompes à chaleur à l'extérieur, incluant le matériel et les travaux	9 300	20	1
2.2 Capots d'isolation acoustique : capots d'isolation acoustique pour pompes à chaleur	9 800	20	1
4. Production de chaleur			
4.2 Pompe à chaleur : Viessmann WP-AW-2-1-S3-PB-75-FU	102 400	20	4
4.3 Intégration hydraulique de la production de chaleur : pompes, vannes de commutation, séparateur hydraulique, divers accessoires de tuyauteries, travaux, postes 2 à 5	25 300	20	1
4.4 Accumulateur de chaleur : réservoir d'accumulation, chauffage, incluant les accessoires de tuyauteries	4 000	30	1
4.5 Isolation : isolation des canalisations et accessoires de tuyauteries	6 200	30	0
6. Distribution de chaleur			
6.1 Distributeur de chauffage : pompes, mitigeurs, divers accessoires de tuyauteries, travaux	4 200	30	1
6.2 Extension : groupe d'extension et de sécurité, incluant divers accessoires de tuyauteries, travaux	4 900	20	1
9. Sanitaire			

9.1 Ballon d'eau chaude : réservoir de la pompe à chaleur eau-eau avec chargement Magro, incluant les pompes, vannes, divers accessoires de tuyauteries et travaux	14 200	20	3
9.2 Distributeur : distribution de la pompe à chaleur eau-eau, incluant le matériel et les travaux	2 100	40	2
9.3 Isolation : isolation des canalisations et accessoires de tuyauteries, incluant le matériel et les travaux	700	30	0
15. Technique du système de mesurage, de commande, de régulation et de contrôle			
15.1 Appareils de terrain : régulateurs et capteurs pour les pompes à chaleur	200	15	2
15.2 Mise en service : mise en service des pompes à chaleur par les techniciens de service	5 200	15	0
16. Électricité			
16.1 Démontage : travaux et élimination	1 000	15	0
16.2 Câblage : matériel électrique et travaux	15 000	20	1
16.3 Extension de la ligne d'alimentation/de l'alimentation : travaux du Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz) et contribution aux coûts du réseau	13 000	50	0
17. Architecte			
17.1 Travaux de démolition : élimination de l'ancien système de chauffage, incluant les travaux et les frais	1 100	20	0
17.2 Grue/montage : montage de la pompe à chaleur	1 800	20	0
17.3 Travaux de toiture : création de percées, incluant le matériel et les travaux	7 100	20	0
17.4 Tranchées de câbles, extension de la ligne d'alimentation : travaux de creusement, pose de conduites vides et carottage, incluant le matériel	3 800	20	0
18. Honoraires			
18.1 Honoraires : ingénieur HLKKSE, ingénieur en génie civil, autorisations	46 900	20	0
Total des coûts d'investissement	***308 200***		

Coûts annuels

Les coûts annuels qui en résultent ont été déterminés en utilisant l'outil « Comparaison des variantes - systèmes énergétiques » du Service de construction de bâtiments de la ville de Zurich [18]. Les données sous-jacentes sont :

- Taux d'intérêt des calculs : 2,5 %
- Période d'observation : 15 ans

La période d'observation est pertinente par rapport à l'augmentation imputée des prix de l'énergie. Les augmentations de prix utilisées dans cette étude figurent à l'annexe 20. D'autres données de base, telles que les prix de l'énergie, se trouvent également à l'annexe 20. Les subventions qui peuvent être demandées dans le cadre des subventions de 2000 watts du Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz) sont énumérées à l'annexe 21.

Tableau 26 : Aperçu des coûts annuels, rue Müllerstrasse 34, solution 4 mode monovalent

Désignation	Montant
Contributions de financement uniques – contributions de 2000 watts (Service d'électricité de la ville de Zurich – EWZ)	11 923 CHF
Coûts énergétiques annuels	15 150 CHF
Coûts de maintenance annuels	4 460 CHF
Coût annuel du capital hors subventions	19 090 CHF
Coûts d'investissement annuels **avec subventions**	18 350 CHF
Coûts annuels totaux hors subventions	38 700 CHF
Coûts annuels totaux **avec subventions**	37 960 CHF
Coûts de production de chaleur hors subventions	22,3 centimes/kWh
Coûts de production de chaleur **avec subventions**	**21,9 centimes/kWh**

10.2.5 Étude de projets, solution 5 – installation sur toit version compacte – mode bivalent

10.2.5.1 Mode de fonctionnement et dimensionnement de la puissance de chauffage de la pompe à chaleur

Pour l'installation de pompes à chaleur compactes sur le toit à Müllerstrasse 34, deux appareils d'Alpha Innotec (AIT) sont utilisés (une unité de chaque) :

- LW180A
- LW 251A

Les pompes à chaleur doivent être régulées à l'aide de la régulation en cascade standard d'AIT. Afin de pouvoir réduire au minimum les émissions sonores, des capots d'isolation acoustiques appropriés sont utilisés.

- Puissance de chauffage @ A-8/W55 : 12/18 kW
- Température de départ maximale : 60 °C @ A-10
- Efficacité : COP @ A-7/W50 2,7/2,6, COP @ A2/W35 3,8/3,8
- Puissance acoustique : 57/62 dB (A)
- Protection par fusibles : 20/25 A (« lente »)
- Réfrigérant : R407C (GWP ~ 1770)
- Courant de démarrage : 30/30 A
- Poids : 420/540 kg
- Dimensions :
  LxHxP 1,9x1,8x1,1 m (LW180A)
  LxHxP 1,9x1,8x1,3 m (LW251A)

Schéma 142 : Pompe à chaleur air-eau d'Alpha Innotec (source : Alpha Innotec AG)

La chaudière au gaz Junkers déjà mentionnée est destinée à supporter le concept de fonctionnement bivalent :

- Puissance de chauffage : 4,9-40 kW
- Protection par fusibles : monophasée 6 A (« lente »)
- Niveau de puissance acoustique : 51 dB (A)
- Poids : 148 kg
- Dimensions : LxHxP 0,6x0,7x0,4 m

Schéma 143 : Chaudière au gaz murale Junkers (source : www.junkers.com)

10.2.5.2 Installation de la pompe à chaleur

Les schémas ci-dessous illustrent l'installation des pompes à chaleur compactes, le câblage, le réservoir et la chaudière au gaz.

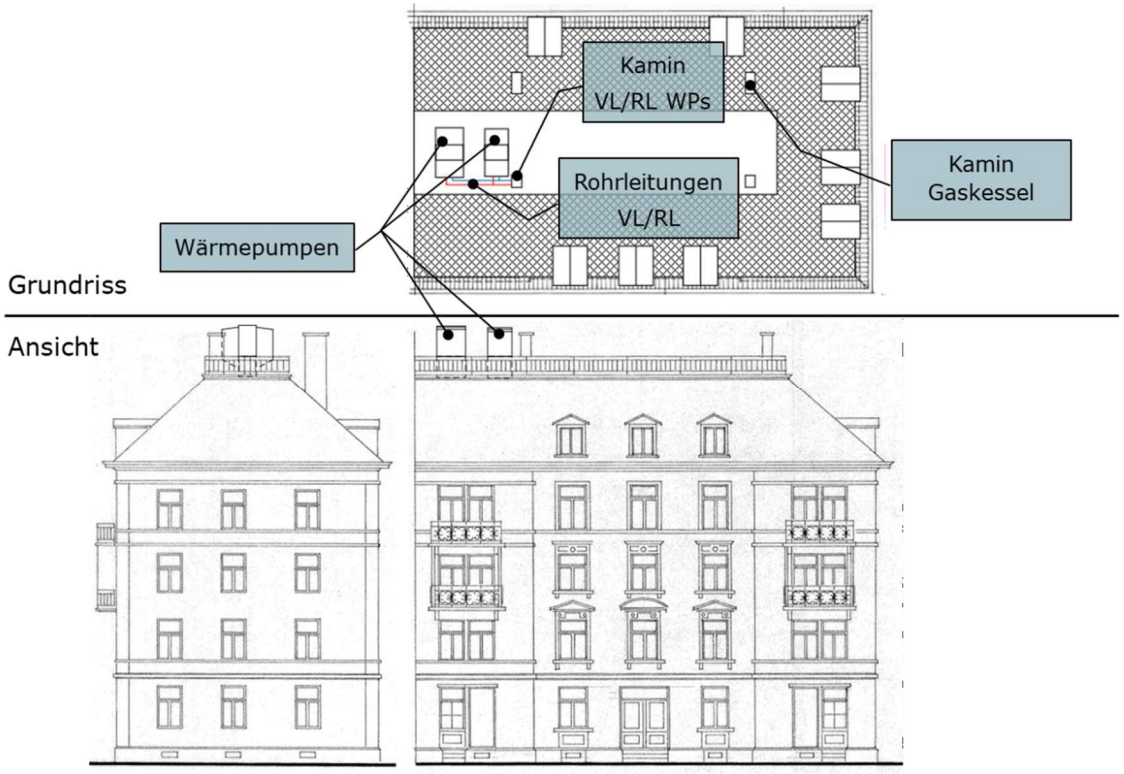


Schéma 144 : Vues extérieures, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode bivalent

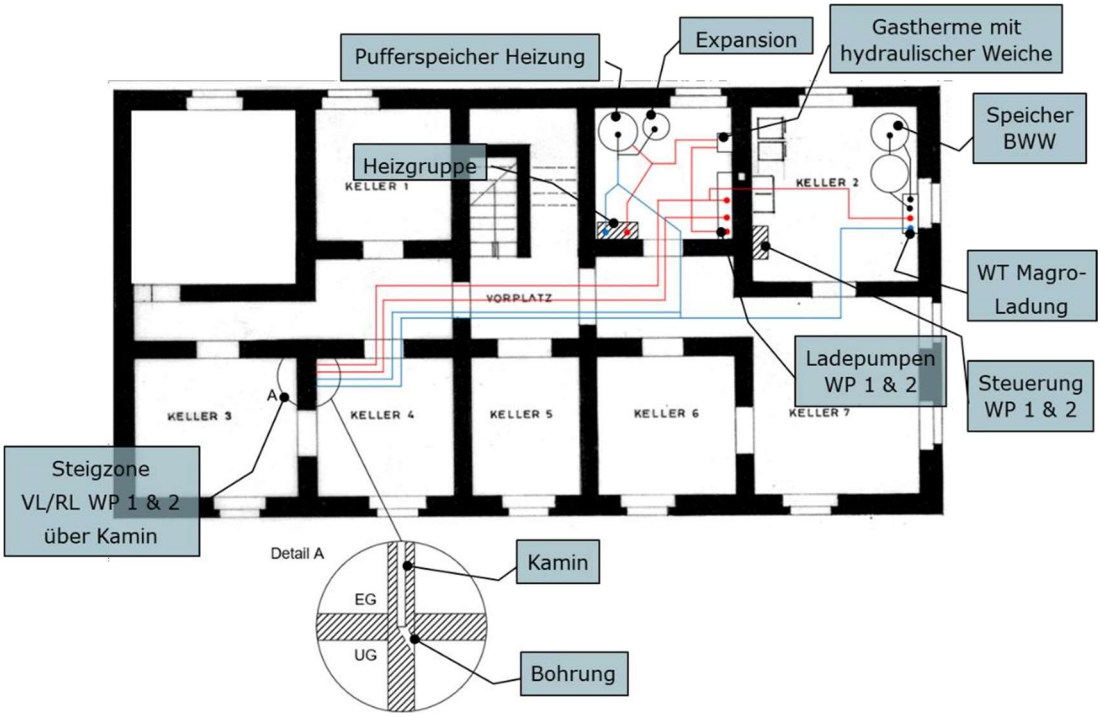


Schéma 145 : Plan sommaire, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode bivalent

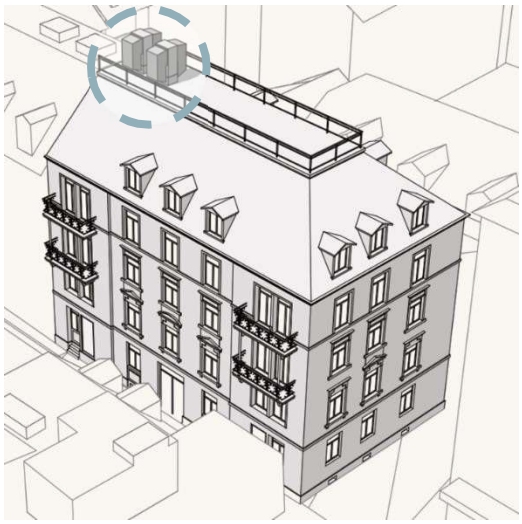


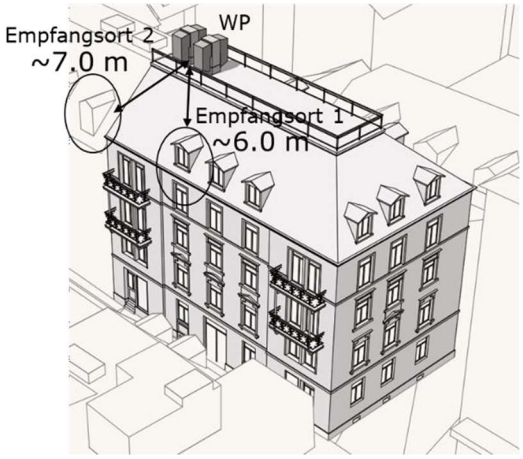
Schéma 146 : Visualisation 3D, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode bivalent

10.2.5.3 Preuve de la protection contre le bruit

Afin de satisfaire la preuve de la protection contre le bruit, les pompes à chaleur compactes sont dotées de capots d'isolation acoustique correspondants. Il en résulte un niveau d'évaluation de 43 dB (A) [17] au point de réception le plus proche 1, ce qui, compte tenu du niveau de sensibilité du bien immobilier, est considéré comme susceptible d'obtenir une autorisation.

- Niveau de puissance acoustique : 63 dB (A)
- Niveau de sensibilité : III (50 dB (A))
- Point de réception 1 : bâtiment voisin
- Installation : pompe à chaleur autonome (+3 dB)
- Correction de niveau K1 : fonctionnement de nuit +10 dB
- Correction de niveau K2 : à peine audible + 2 dB
- Correction de niveau K3 : à peine audible + 2 dB
- Protection contre le bruit : capots d'isolation acoustique -13 dB
- Niveau d'évaluation du point de réception 1 : 43 dB (A)

Une installation extérieure avec une pompe à chaleur air-eau standard compacte est **susceptible d'obtenir une autorisation**.



.47 : Preuve de la protection contre le bruit, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode bivalent

10.2.5.4 Intégration hydraulique et concept de réglage

Sur le plan hydraulique, l'intégration est identique aux autres solutions en mode de fonctionnement bivalent aux chapitres 10.2.2.4 et 10.2.3.4. Toutefois, avec cette solution, la technologie complète de la pompe à chaleur est installée sur le toit (l'annexe 14 montre un agrandissement du schéma ci-dessous).

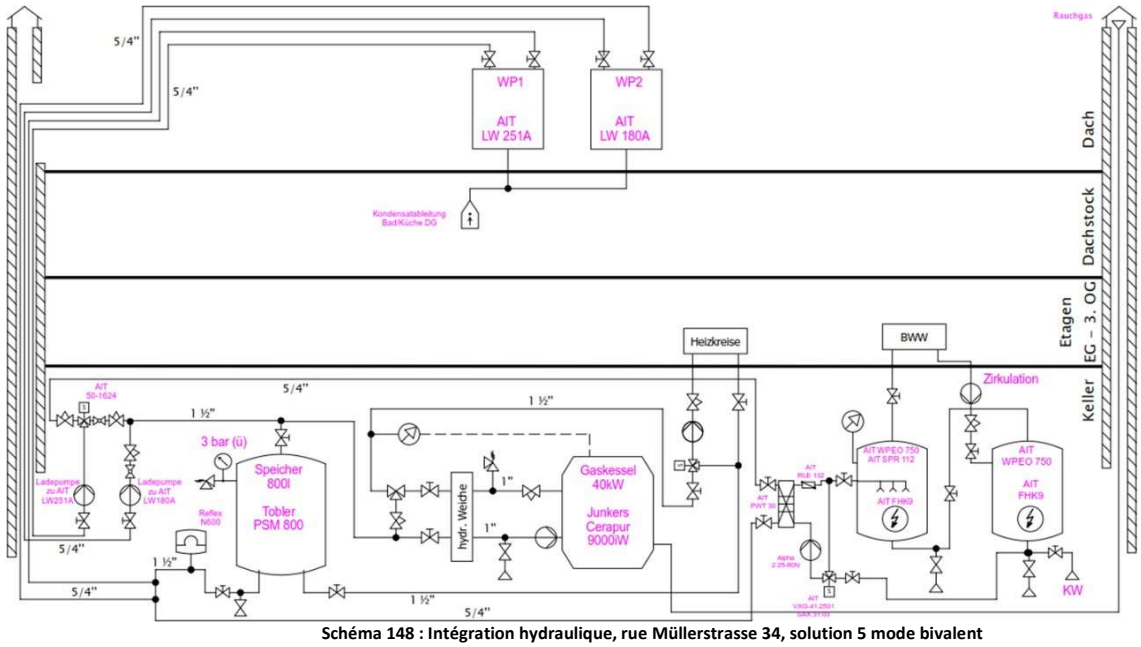


Schéma 148 : Intégration hydraulique, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode bivalent

10.2.5.5 Mesures structurelles

Les mesures suivantes doivent être prises lors de la mise en œuvre :

- Démontage et élimination des systèmes de chauffage existants
- Adaptation structurelle des cheminées pour une utilisation à titre de colonnes montantes des pompes à chaleur VL/RL
- Mesures structurelles sur la structure du toit pour améliorer la statique dans la zone d'installation des pompes à chaleur – construction de poutres d'acier dans le grenier (voir schéma 149)
- Pose et montage du support d'installation des pompes à chaleur
- Pose et montage de pompes à chaleur
- Remplacement des fusibles sur le distributeur principal à 100 A

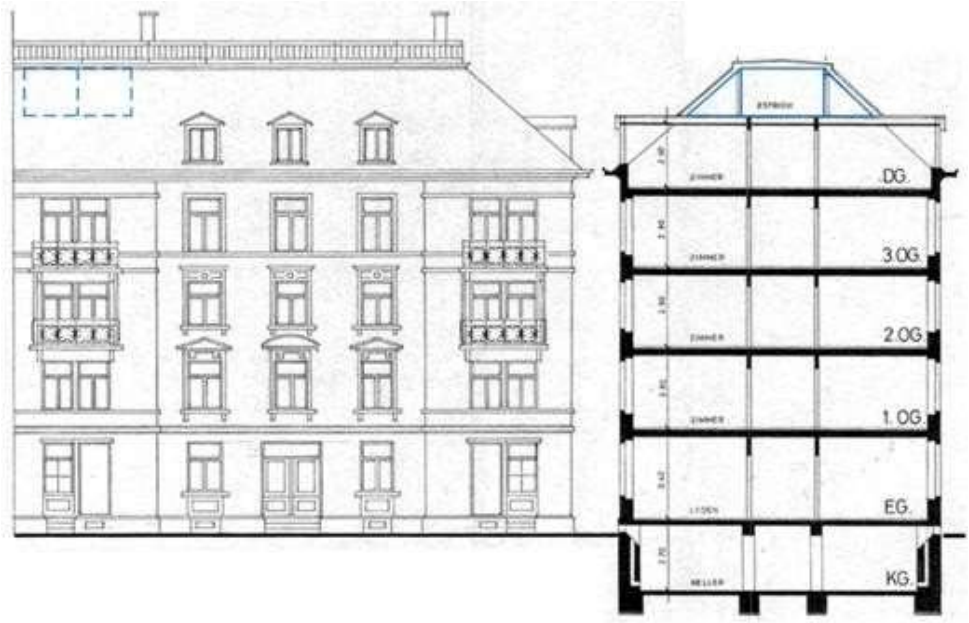


Schéma 149 : Renforcement de la structure du toit, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode bivalent

10.2.5.6 Fonctionnement du système

Les schémas ci-dessous montrent le fonctionnement du système de pompe à chaleur en fonction de la température ambiante. Les courbes de la puissance de chauffage générée par les pompes à chaleur et le coefficient de performance en mode chauffage COPH sont affichées. Afin que l'efficacité du système puisse être évaluée et comparée, les performances annuelles correspondantes ont été calculées :

- Coefficient de performance annuel pour le chauffage JAZ_H : 2,87
- Coefficient de performance annuel pour la pompe à chaleur eau-eau JAZ_{BWW} : 3,00
- Coefficient de performance annuel pour le chauffage et la pompe à chaleur eau-eau JAZ_{ges} : 2,89

Le calcul tient compte de la distribution de fréquence horaire de la température ambiante à Zurich ainsi que de la courbe de chauffage déterminée au paragraphe 10.2.1.3.

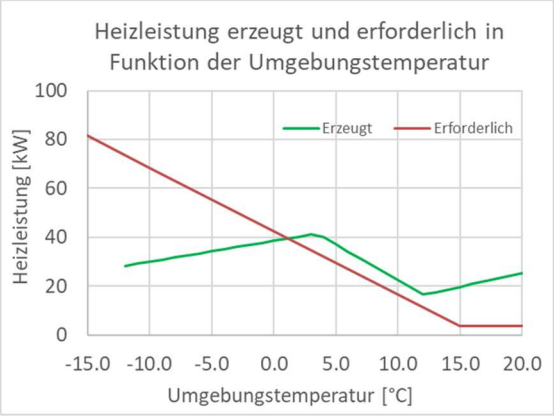


Schéma 150 : Aperçu de la puissance de chauffage requise, rue Müllerstrasse 34 et de la puissance de chauffage générée par la ou les pompes à chaleur, solution 5 mode bivalent

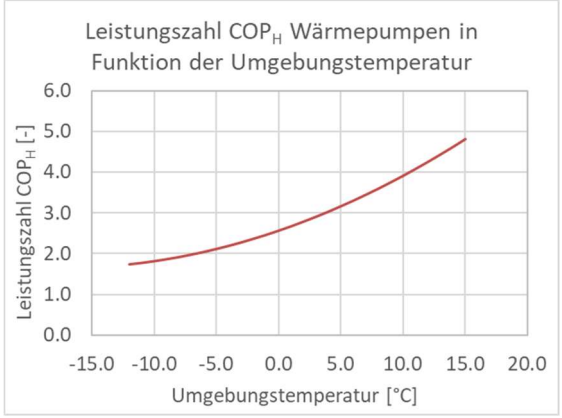


Schéma 151 : Comportement du COP à température ambiante, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode bivalent

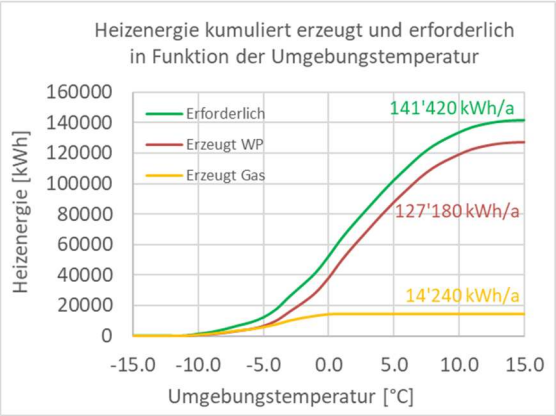


Schéma 152 : Énergie de chauffage annuelle, rue Müllerstrasse 34, cumulée en fonction de la température extérieure, solution 5 mode bivalent

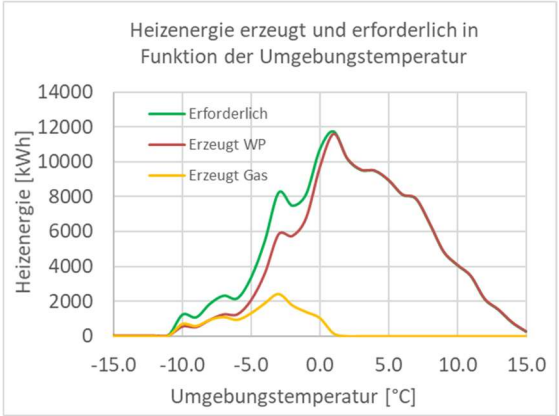


Schéma 153 : Énergie de chauffage annuelle, rue Müllerstrasse 34, en fonction de la température extérieure, solution 5 mode bivalent

10.2.5.7 Synthèse des coûts

Les coûts d'investissement et les coûts annuels qui en résultent sont résumés ci-dessous. Il convient de mentionner ici que les coûts de rénovation du système de distribution et de dissipation du chauffage et de distribution d'eau chaude n'ont pas été pris en compte.

Coûts d'investissement

Les coûts indiqués correspondent au stade de l'étude de faisabilité (+/- 25 %) et sont valables s'ils sont mis en œuvre dans la ville de Zurich. Les frais d'investissement totaux d'après les offres obtenues s'élèvent à 226 600 CHF +/- 25 % (voir tableau 27).

Tableau 27 : Récapitulatif des coûts d'investissement, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode bivalent

Poste	Coûts HT – Phase d'étude de faisabilité +/- 25 % [CHF]	Durée d'utilisation [a]	Coûts de maintenance [%]
1. Travaux préliminaires			
1.2 Mesures statiques concernant le toit : renforcement du grenier à l'aide de poutres en acier, incluant le matériel et les travaux	30 000	30	0
2. Technique/source de chaleur			
2.1 Câbles de raccordement : câbles de raccordement pour les pompes à chaleur à l'extérieur, incluant le matériel et les travaux	1 800	20	1
2.2 Capots d'isolation acoustique : capots d'isolation acoustique pour les pompes à chaleur	22 400	20	1
3. **Approvisionnement énergétique**			
3.1 Canalisation d'alimentation de gaz : adaptations de la canalisation d'alimentation de gaz, incluant le matériel et les travaux	800	30	2

3.2 Fusibles de protection pour le gaz : accessoires de tuyauteries	100	30	2
4.1 Chaudière : chaudière au gaz Junkers Cerapur 9000 iW 45 23	5 800	20	3
4.2 Pompe à chaleur : AIT LW 251 A & AIT LW 180 A	44 100	20	4
4.3 Intégration hydraulique de la production de chaleur : pompes, vannes de commutation, séparateur hydraulique, divers accessoires de tuyauteries, travaux, postes 2 à 5	19 100	20	1
4.4 Accumulateur de chaleur : réservoir d'accumulation, chauffage, y compris les accessoires de tuyauteries	2 000	30	1
4.5 Isolation : isolation des canalisations et accessoires de tuyauteries	7 100	30	0
5. Cheminée			
5.1 Cheminée : matériel de cheminée	1 200	20	3
6. Distribution de chaleur			
6.1 Distributeur de chauffage : pompes, mitigeurs, divers accessoires de tuyauteries, travaux	4 200	30	1
6.2 Extension : groupe d'extension et de sécurité, incluant divers accessoires de tuyauteries, travaux	5 100	20	1
9. Sanitaire			
9.1 Ballon d'eau chaude : réservoir de la pompe à chaleur eau-eau avec chargement Magro, incluant les pompes, vannes, divers accessoires de tuyauteries et travaux	14 200	20	3
9.2 Distributeur : distribution de la pompe à chaleur eau-eau, incluant le matériel et les travaux	2 100	40	2
9.3 Isolation : isolation des canalisations et accessoires de tuyauteries, incluant le matériel et les travaux	700	30	0
15. **Technique du système de mesurage, de commande, de régulation et de contrôle**			
15.1 Appareils de terrain : régulateurs et capteurs, pompes à chaleur et chaudières au gaz	2 700	15	2
15.2 Mise en service : mise en service des pompes à chaleur et des chaudières au gaz par des techniciens de service	5 000	15	0
16. Électricité			
16.1 Démontage : travaux et élimination	1 000	15	0
16.2 Câblage : matériel électrique et travaux	11 300	20	1
17. Travaux annexes			
17.1 Travaux de démolition : élimination du système de chauffage existant, y compris les travaux et les frais	1 100	20	0
17.2 Grue/pose : pose de la pompe à chaleur	1 800	20	0
17.3 Travaux de toiture : création de percées, incluant le matériel et les travaux	5 800	20	0
18. Honoraires			

18.1 Honoraires : ingénieur HLKKSE, ingénieur en génie civil, autorisations	37 200	20	0
Total des coûts d'investissement	***226 600***		

Coûts annuels

Les coûts annuels qui en résultent ont été déterminés en utilisant l'outil « Comparaison des variantes - Systèmes énergétiques » du Service de la construction de bâtiments de la ville de Zurich [18]. Les données sous-jacentes sont :

- Taux d'intérêt des calculs : 2,5 %
- Période d'observation : 15 ans

La période d'observation est pertinente par rapport à l'augmentation imputée des prix de l'énergie. Les augmentations de prix utilisées dans cette étude figurent à l'annexe 20. D'autres données de base, telles que les prix de l'énergie, se trouvent également à l'annexe 20. Les subventions qui peuvent être demandées dans le cadre des subventions de 2000 watts du Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz) sont énumérées à l'annexe 21.

Tableau 28 : Aperçu des coûts annuels, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode bivalent

Désignation	Montant
Contributions de financement uniques – contributions de 2000 watts (Service d'électricité de la ville de Zurich – EWZ)	10 304 CHF
Coûts énergétiques annuels	15 970 CHF
Coûts de maintenance annuels	2 590 CHF
Coût annuel du capital hors subventions	13 890 CHF
Coûts d'investissement annuels **avec subventions**	13 260 CHF
Coûts annuels totaux hors subventions	32 450 CHF
Coûts annuels totaux **avec subventions**	31 820 CHF
Coûts de production de chaleur hors subventions	18,7 centimes/kWh
Coûts de production de chaleur **avec subventions**	**18,4 centimes/kWh**

10.2.6 Étude de projets, solution 5 – Installation sur le toit version compacte – mode monovalent

10.2.6.1 Fonctionnement et dimensionnement de la puissance de chaleur de la pompe à chaleur

Le concept de fonctionnement monovalent peut être mis en œuvre avec trois pompes à chaleur compactes d'Alpha Innotec et régulé à l'aide du réglage en cascade standard d'AIT. Les spécifications de l'appareil LW310 A défini sont :

- Puissance de chauffage @ A-8/W50 : 24 kW
- Température de départ maximale : 58 °C @ A-10
- Efficacité : COP @ A-7/W50 2,7, COP @ A2/W35 3,6
- Puissance acoustique : 67 dB (A)
- Protection par fusibles : 32 A (« lent »)
- Courant de démarrage : 38 A
- Réfrigérant : R404A (GWP 3920)
- Poids : 573 kg
- Dimensions : LxHxP 1,8x2,2x1,3 m

Schéma 154 : Pompe à chaleur air-eau Alpha Innotec (source : Alpha Innotec AG)

10.2.6.2 Installation de la pompe à chaleur

Les visualisations suivantes illustrent l'intégration des pompes à chaleur compactes sur le toit.

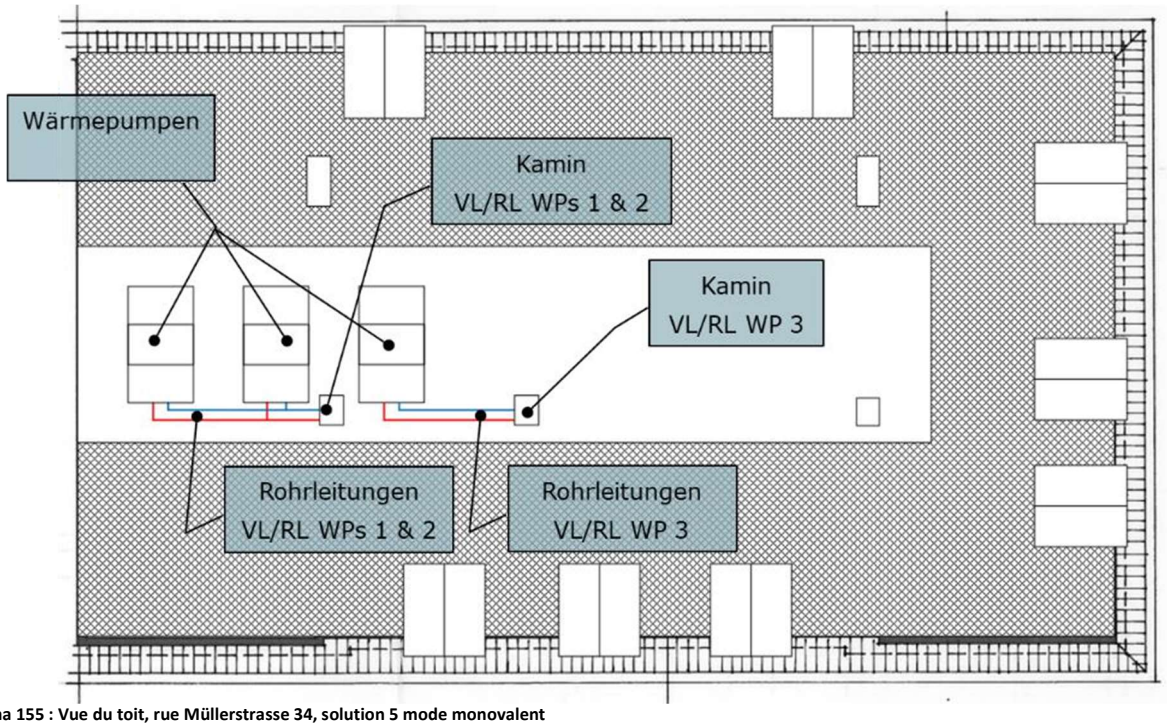


Schéma 155 : Vue du toit, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode monovalent

Schéma 156 : Vue extérieure, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode monovalent

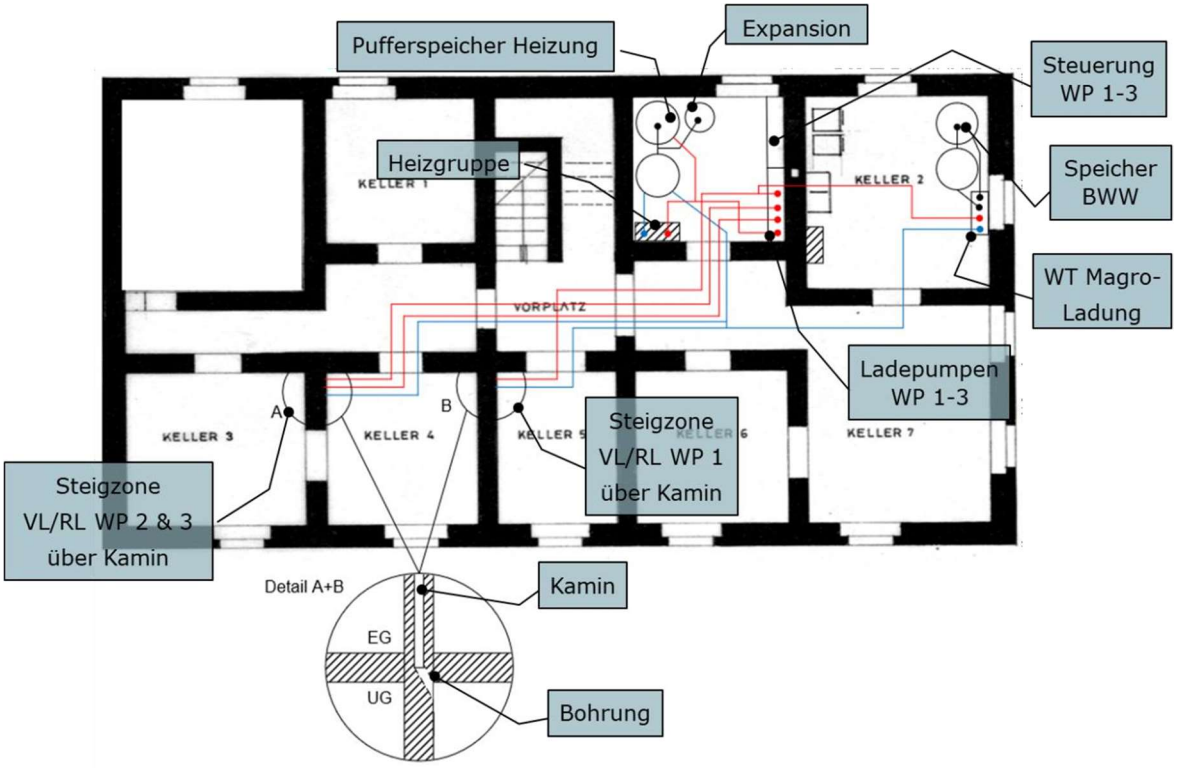


Schéma 157 : Plan sommaire, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode monovalent

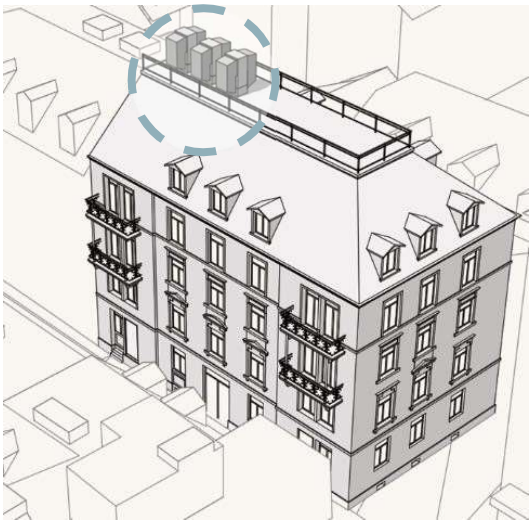


Schéma 158 : visualisation 3D, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode monovalent

10.2.6.3 Preuve de la protection contre le bruit

Afin de minimiser les émissions sonores des pompes à chaleur, des capots d'isolation acoustique appropriés doivent être installés. Il en résulte un niveau d'évaluation de 49 dB (A) [17] au point de réception le plus proche 1, ce qui, compte tenu du niveau de sensibilité du bien immobilier, est considéré comme susceptible d'obtenir une autorisation.

- Niveau de puissance acoustique : 69 dB (A)
- Niveau de sensibilité : III (50 dB (A))
- Point de réception 1 : propre bâtiment
- Installation : pompe à chaleur sur pied (+3 dB)
- Correction de niveau K1 : fonctionnement de nuit +10 dB
- Correction de niveau K2 : à peine audible + 2 dB
- Correction de niveau K3 : à peine audible + 2 dB
- Protection contre le bruit : capot d'isolation acoustique -13 dB
- Niveau d'évaluation du point de réception 1 : 49 dB (A)

Une installation extérieure avec une pompe à chaleur air-eau standard en version compacte est **susceptible d'obtenir une autorisation**.

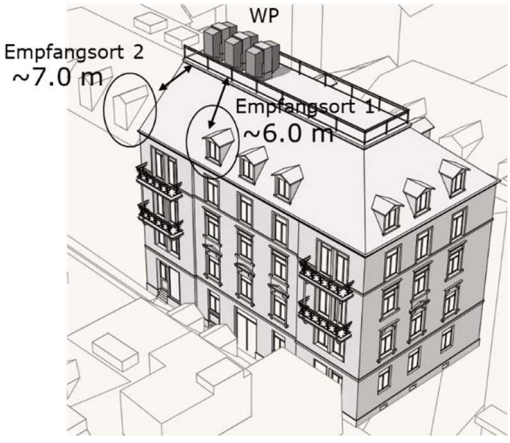


Schéma 159 : Preuve de la protection contre le bruit, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode monovalent

10.2.6.4 Intégration hydraulique et concept de réglage

La structure hydraulique correspond à celle du chapitre 10.2.5.4, mais élargie pour inclure une pompe à chaleur compacte supplémentaire. Comme il s'agit d'un concept de fonctionnement monovalent, aucun système de fourniture de chaleur supplémentaire n'est utilisé (voir également l'annexe 15).

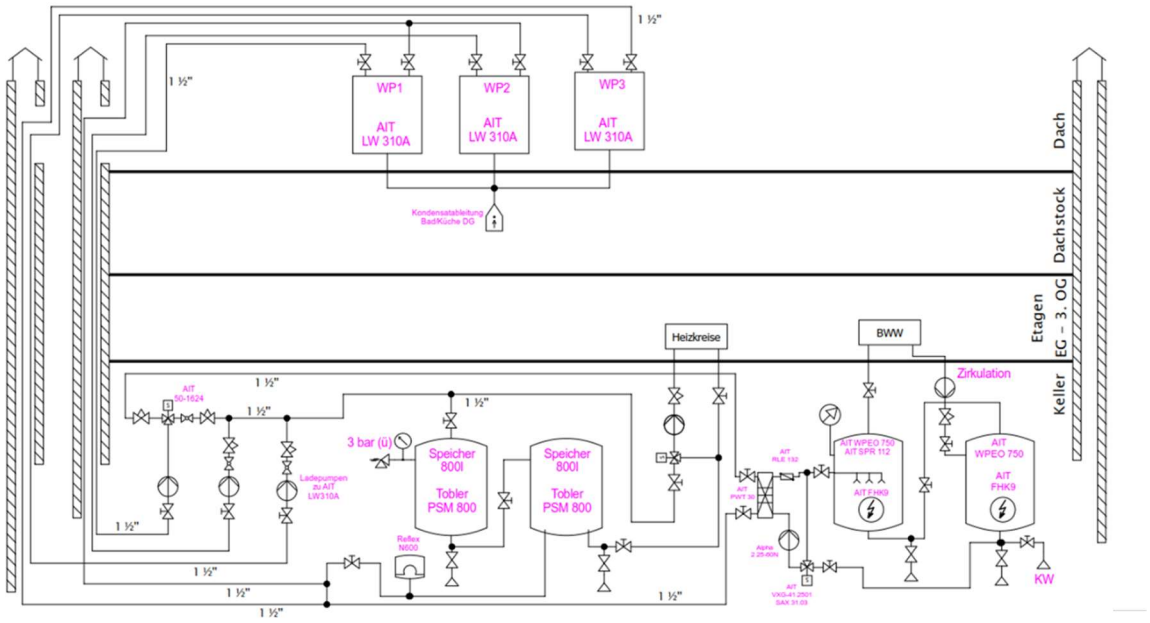


Schéma 160 : Intégration hydraulique, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode monovalent

10.2.6.5 Mesures structurelles

Les mesures suivantes doivent être prises en compte lors de la mise en œuvre :

- Démontage et élimination des systèmes de chauffage existants
- Travaux de creusement pour agrandir l'alimentation électrique
- Extension de l'alimentation par le Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz)
- Adaptation structurelle des cheminées pour une utilisation à titre de colonnes montantes. Pompes à chaleur VL/RL
- Mesures structurelles sur la structure du toit pour améliorer la statique dans la zone d'installation des pompes à chaleur – construction de poutres en acier dans le grenier (voir schéma 161)
- Pose et montage du support d'installation des pompes à chaleur
- Pose et montage des pompes à chaleur
- Renforcement de la ligne d'alimentation électrique (creusement des lignes et raccordement, remplacement des fusibles principaux)

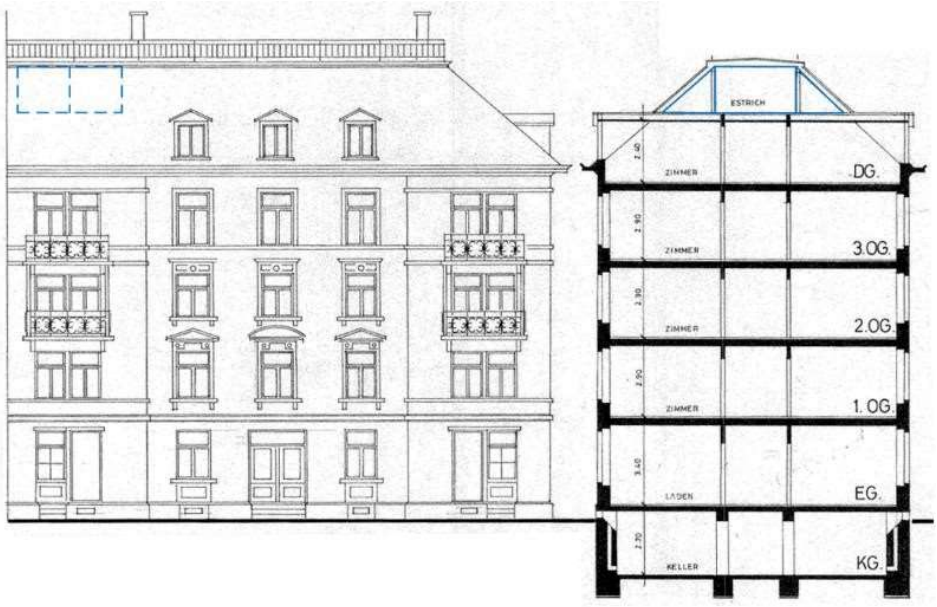


Schéma 161 : Renforcement de la structure du toit, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode monovalent

10.2.6.6 Fonctionnement du système

Les schémas ci-dessous montrent le fonctionnement du système de pompe à chaleur en fonction de la température ambiante. Les courbes de la puissance de chauffage générée par les pompes à chaleur et le coefficient de performance en mode chauffage COPH sont affichées. Afin que l'efficacité du système puisse être évaluée et comparée, les performances annuelles correspondantes ont été calculées :

- Coefficient de performance annuel pour le chauffage — JAZ_H : 2,89
- Coefficient de performance annuel pour la pompe à chaleur eau-eau — JAZ_{BWW} : 3,10
- Coefficient de performance annuel pour le chauffage et la pompe à chaleur eau-eau — JAZ_{ges} : 2,92

Le calcul tient compte de la distribution horaire de fréquence de la température ambiante à Zurich et de la courbe de chauffage déterminée au paragraphe 10.2.1.3.

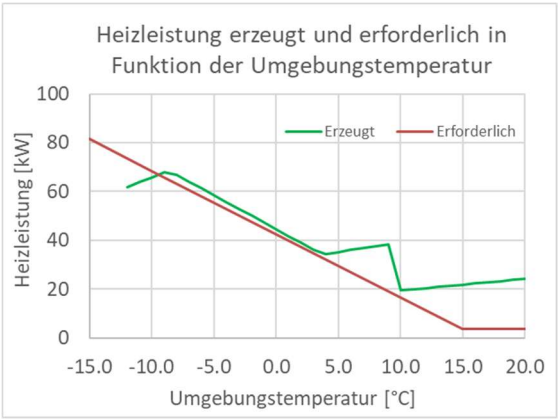


Schéma 162 : Aperçu de la puissance de chauffage requise, rue Müllerstrasse 34 et de la puissance de chauffage générée par la ou les pompes à chaleur, solution 5 mode monovalent

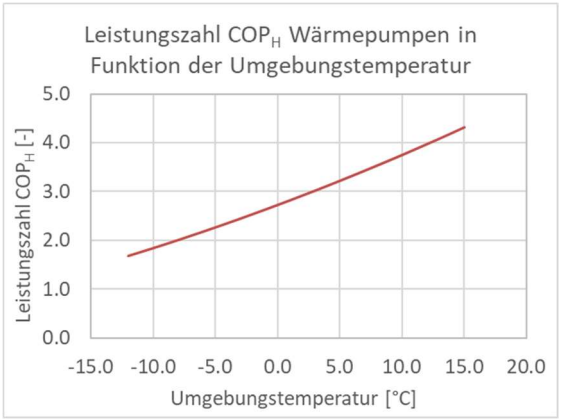


Schéma 163 : Comportement du COP à température ambiante, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode monovalent

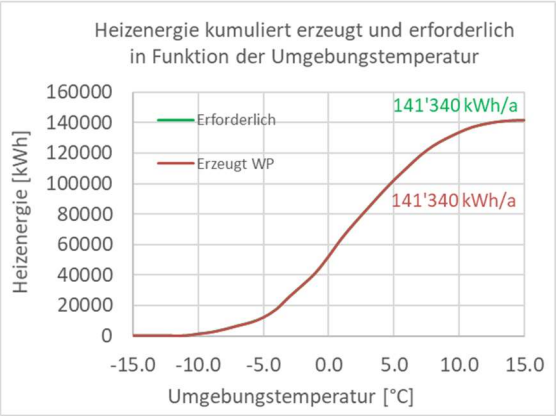


Schéma 164 : Énergie de chauffage annuelle, rue Müllerstrasse 34, cumulée en fonction de la température extérieure, solution 5 mode monovalent

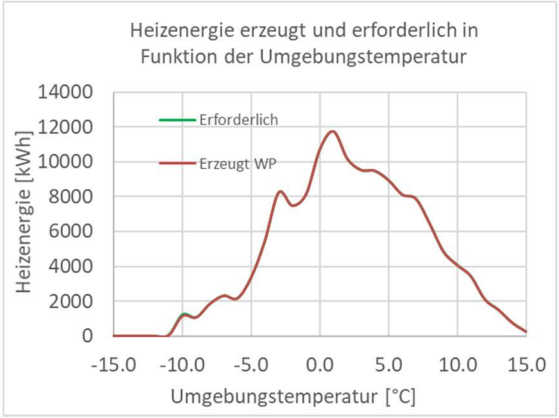


Schéma 165 : Énergie de chauffage annuel, rue Müllerstrasse 34, en fonction de la température extérieure, solution 5 mode monovalent

10.2.6.7 Synthèse des coûts

Un aperçu des coûts d'investissement et des coûts annuels est donné ci-dessous. Il convient de mentionner que les coûts de rénovation du système de distribution et de dissipation de chauffage et de distribution d'eau chaude n'ont pas été pris en compte.

Coûts d'investissement

Les coûts indiqués correspondent au stade de l'étude de faisabilité (+/- 25 %) et sont valables s'ils sont mis en œuvre dans la ville de Zurich. Les frais d'investissement totaux d'après les offres obtenues s'élèvent à 312 700 CHF +/- 25 % (voir tableau 29).

Tableau 29 : Récapitulatif des coûts d'investissement, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode monovalent

Poste	Coûts HT - Phase d'étude de faisabilité +/- 25 % [CHF]	Durée d'utilisation [a]	Coûts de maintenance [%]
1. Travaux préliminaires			
1.2 Mesures statiques concernant le toit : renforcement du grenier à l'aide de poutres en acier, incluant le matériel et les travaux	30 000	30	0
2. Technique/source de chaleur			
2.1 Câbles de raccordement : câbles de raccordement pour les pompes à chaleur à l'extérieur, incluant le matériel et les travaux	2 600	20	1
2.2 Capots d'isolation acoustique : capots d'isolation acoustique pour les pompes à chaleur	36 300	20	1
4. Production de chaleur			
4.2 Pompe à chaleur : 3 unités LW 310 A	82 500	20	4
4.3 Intégration hydraulique de la production de chaleur : pompes, vannes de commutation, séparateur hydraulique, divers accessoires de tuyauteries, travaux, postes 2 à 5	23 900	20	1

4.4 Accumulateur de chaleur : Chauffage à accumulation tampon incl. raccords	4 000	30	1
4.5 Isolation : isolation des tuyaux et des raccords	7 900	30	0
6. Distribution de chaleur			
6.1 Distributeur de chauffage : pompes, mitigeurs, divers accessoires de tuyauteries, travaux	4 200	30	1
6.2 Extension : groupe d'extension et de sécurité, incluant divers accessoires de tuyauteries, travaux	4 900	20	1
9. Sanitaire			
9.1 Ballon d'eau chaude : réservoir pour la pompe à chaleur eau-eau avec chargement Magro, incluant les pompes, vannes, divers accessoires de tuyauteries et travaux	14 200	20	3
9.2 Distributeur : distribution de la pompe à chaleur eau-eau, incluant le matériel et les travaux	2 100	40	2
9.3 Isolation : isolation des canalisations et accessoires de tuyauteries, incluant le matériel et les travaux	700	30	0
15. Technique du système de mesurage, de commande, de régulation et de contrôle			
15.1 Appareils de terrain : régulateurs et capteurs pour les pompes à chaleur	4 000	15	2
15.2 Mise en service : mise en service des pompes à chaleur par les techniciens de service	5 200	15	0
16. Électricité			
16.1 Démontage : travaux et élimination	1 000	15	0
16.2 Câblage : matériel électrique et travaux	15 000	20	1
16.3 Extension de la ligne d'alimentation/de l'alimentation : travaux du Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz) et contribution aux coûts du réseau	13 000	50	0
17. Architecte			
17.1 Travaux de démolition : élimination de l'ancien système de chauffage, incluant les travaux et les frais	1 100	20	0
17.2 Grue/pose : pose de la pompe à chaleur	1 800	20	0
17.3 Travaux de toiture : création de percées, incluant le matériel et les travaux	7 100	20	0
17.4 Tranchées de câbles, extension de la ligne d'alimentation : creusement, pose de conduites vides et carottage, incluant le matériel	3 800	20	0
18. Honoraires			
18.1 Honoraires : ingénieur HLKKSE, ingénieur en génie civil, autorisations	47 400	20	0
Total des coûts d'investissement	***312 700***		

Coûts annuels

Les coûts annuels qui en résultent ont été déterminés en utilisant l'outil « Comparaison des variantes - Systèmes énergétiques » du Service de la construction de bâtiments de la ville de Zurich [18]. Les données sous-jacentes sont :

- Taux d'intérêt des calculs : 2,5 %
- Période d'observation : 15 ans

La période d'observation est pertinente par rapport à l'augmentation imputée des prix de l'énergie. Les augmentations de prix utilisées dans cette étude figurent à l'annexe 20. D'autres données de base, telles que les prix de l'énergie, se trouvent également à l'annexe 20. Les subventions qui peuvent être demandées dans le cadre des subventions de 2000 watts du Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz) sont énumérées à l'annexe 21.

Tableau 30 : Aperçu des coûts annuels, rue Müllerstrasse 34, solution 5 mode monovalent

Désignation	Montant
Contributions de financement uniques – contributions de 2000 watts (Service d'électricité de la ville de Zurich – EWZ)	11 923 CHF
Coûts énergétiques annuels	16 900 CHF
Coûts de maintenance annuels	3 910 CHF
Coût annuel du capital hors subventions	19 040 CHF
Coûts d'investissement annuels **avec subventions**	18 310 CHF
Coûts annuels totaux hors subventions	39 850 CHF
Coûts annuels totaux **avec subventions**	39 120 CHF
Coûts de production de chaleur hors subventions	23,0 centimes/kWh
Coûts de production de chaleur **avec subventions**	**22,6 centimes/kWh**

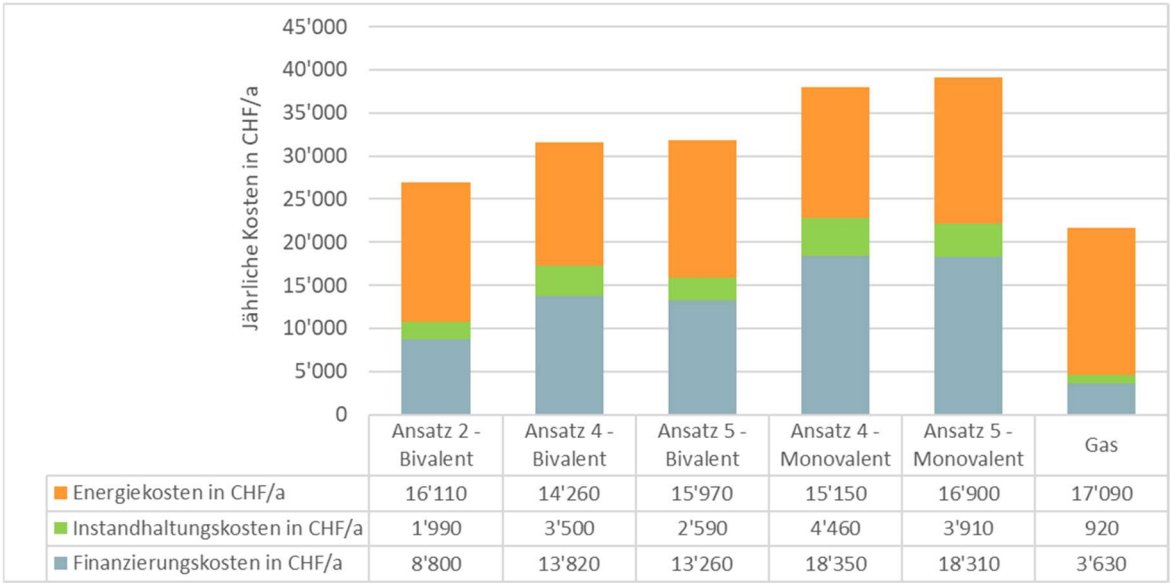
10.2.7 Bilan de l'étude de projet rue Müllerstrasse 34

La comparaison des variantes présentées ci-dessous a été réalisée à l'aide de l'outil « Comparaison des variantes des systèmes énergétiques version 2.2 » de l'Office des bâtiments de la ville de Zurich [18]. Le tableau 18 présente un résumé des repères les plus importants des différentes solutions soumises à l'étude de projets types.

Tableau 31 : Récapitulatif des coûts en tenant compte des subventions, rue Müllerstrasse 34

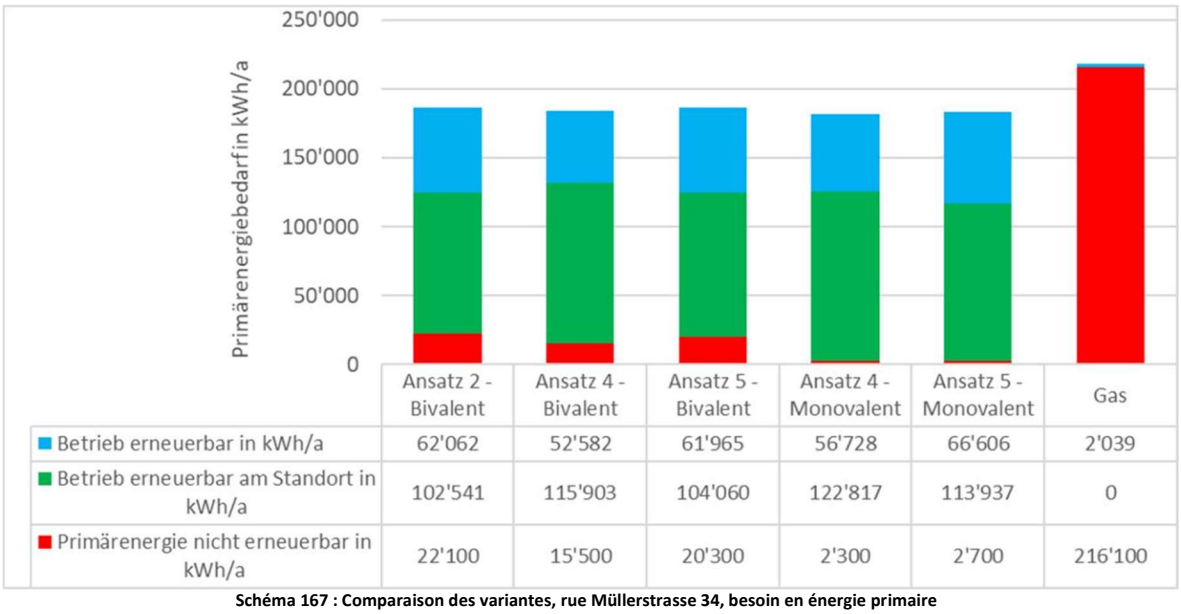
		Pompe à chaleur bivalente		Pompe à chaleur monovalente		
	Solution 2	Solution 4	Solution 5	Solution 4	Solution 5	Gaz
Coûts d'investissement en CHF Phase d'étude de faisabilité +/- 25 %	**152 000**	**235 600**	**226 600**	**308 200**	**312 700**	**59 700**
Coût annuel du capital en CH	8 800	13 820	13 260	18 350	18 310	3 630
Frais de maintenance annuels en CHF	1 990	3 500	2 590	4 460	3 910	920
Coûts énergétiques annuels en CHF	16 110	14 260	15 970	15 150	16 900	17 090
Coûts annuels totaux en CHF	**26 900**	**31 580**	**31 820**	**37 960**	**39 120**	**21 640**
Besoin en énergie primaire en kWh/a	187 700	185 000	187 200	182 900	184 200	219 000
Énergie primaire non renouvelable en kWh/a	22 100	15 500	20 300	2 300	2 700	216 100
Émissions de gaz à effet de serre kg/a	5 120	3 690	4 730	870	960	46 670
Impact environnemental (UBP) en mille points/a	6 540	5 200	6 300	3 740	4 280	28 270
Coûts de la chaleur en centimes/kWh	**15,5**	**18,2**	**18,4**	**21,9**	**22,6**	**12,5**

La ventilation des coûts de la variante gaz est indiquée à l'annexe 16.



	Ansatz 2 - Bivalent	Ansatz 4 - Bivalent	Ansatz 5 - Bivalent	Ansatz 4 - Monovalent	Ansatz 5 - Monovalent	Gas
Energiekosten in CHF/a	16'110	14'260	15'970	15'150	16'900	17'090
Instandhaltungskosten in CHF/a	1'990	3'500	2'590	4'460	3'910	920
Finanzierungskosten in CHF/a	8'800	13'820	13'260	18'350	18'310	3'630

Schéma 166 : Comparaison des variantes, rue Müllerstrasse 34, coûts annuels avec prise en compte des subventions



	Ansatz 2 - Bivalent	Ansatz 4 - Bivalent	Ansatz 5 - Bivalent	Ansatz 4 - Monovalent	Ansatz 5 - Monovalent	Gas
Betrieb erneuerbar in kWh/a	62'062	52'582	61'965	56'728	66'606	2'039
Betrieb erneuerbar am Standort in kWh/a	102'541	115'903	104'060	122'817	113'937	0
Primärenergie nicht erneuerbar in kWh/a	22'100	15'500	20'300	2'300	2'700	216'100

Schéma 167 : Comparaison des variantes, rue Müllerstrasse 34, besoin en énergie primaire

Les études de projets types menées montrent que la quasi-totalité des solutions envisagées peuvent être mises en œuvre avec des pompes à chaleur standard. La seule exception ici est la solution 4 « Installation en extérieur sur un toit split ». En raison de la grande différence de hauteur entre le local technique du sous-sol et le toit, cette solution nécessite l'utilisation d'installations split à liaison hydraulique.

En fonction de la solution utilisée, les coûts de production de chaleur, en tenant compte des éventuelles subventions lors de l'utilisation de pompes à chaleur air-eau, sont de l'ordre de 15,5 centimes/kWh à 22,6 centimes/kWh. En revanche, les coûts de production de chaleur qui en résultent pour un remplacement de chauffage fossile (remplacement des poêles individuels décentralisés par la production de chaleur centralisée) sont de l'ordre de 12,5 centimes/kWh. Les coûts de production de chaleur les plus bas en cas d'utilisation de pompes à chaleur air-eau résultent de l'application de la solution 2 « Installation intérieure au sous-sol » en mode de fonctionnement bivalent de la pompe à chaleur. Les coûts de production de chaleur les plus élevés, en revanche, résultent de l'application de la solution 5 « Installation extérieure sur le toit » en mode monovalent des pompes à chaleur.

S'agissant du mode de fonctionnement de la pompe à chaleur, les études de projets types montrent que la mise en œuvre d'un mode de fonctionnement monovalent des pompes à chaleur peut entraîner des surcoûts considérables par rapport à un système à mode de fonctionnement bivalent parallèle. En tenant compte du fait que les émissions de CO2 en mode bivalent parallèle des pompes à chaleur (puissance de chauffage de la pompe à chaleur de 50 % de la puissance de chauffage requise du bâtiment) peuvent déjà être réduites de 90 % environ par rapport à une rénovation de chauffage fossile, les coûts supplémentaires pour la mise en œuvre d'un système de pompe à chaleur moderne apparaissent économiquement difficilement justifiables. Ce fait peut être clairement illustré en utilisant l'évolution des émissions de CO2 en fonction des coûts d'investissement illustrés au schéma 168.

S'agissant de la stratégie énergétique 2050 et de l'élimination obligatoire du CO2, il convient de souligner à ce stade que les solutions bivalentes ne sont généralement pas recommandées. Dans ce contexte, les solutions avec des pompes à chaleur en mode monovalent doivent obligatoirement être privilégiées. En raison de la faisabilité nettement améliorée (coûts, mise en œuvre, sécurité de fonctionnement, etc.), les solutions en mode bivalente de la pompe à chaleur peuvent encore présenter un intérêt à court et à moyen terme et faciliter voire rendre possible la distribution future des pompes à chaleur air-eau dans les zones urbaines.

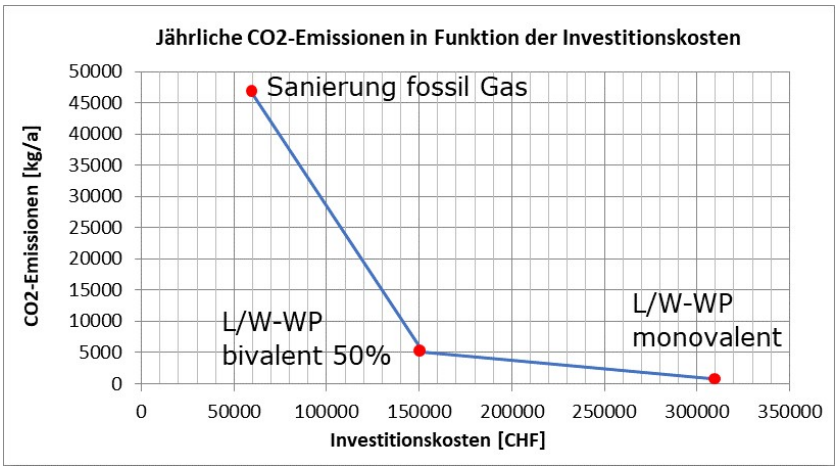


Schéma 168 : Comparaison des émissions de CO2 avec les coûts d'investissement, Müllerstrasse 34

10.3 Rue Kruggasse 8

10.3.1 Situation

Les caractéristiques importantes du bien immobilier situé à Kruggasse 8 sont résumées au chapitre 7.3. Les points relatifs à la conception du système de pompe à chaleur sont indiqués ci-dessous. Remarque : l'eau chaude et l'eau de chauffage des immeubles situés à Kruggasse 6 et 8 sont fournies via le local technique à Kruggasse 8.

Schéma 169 : Vues de la rue Kruggasse 8, Zurich

10.3.1.1 Zonage

- Zone du centre, classée
- Niveau de sensibilité III

Le bâtiment étant situé dans la zone du centre et classé, il ne sera possible d'apporter des modifications à l'extérieur du bâtiment que dans des conditions strictes. Le niveau de sensibilité III ne nécessite aucune exigence particulière concernant les émissions sonores.

10.3.1.2 Conditions spatiales

La rue Kruggasse 8, située dans la zone du centre, est entourée d'autres bâtiments et n'offre donc aucune possibilité pour la pompe à chaleur d'être installée à l'extérieur sur la propriété. Seule une installation extérieure de la pompe à chaleur sur le toit du bâtiment doit être examinée.

La chaleur est actuellement produite par le chauffage au gaz dans le grenier, la chaleur et l'eau chaude sont donc distribuées aux divers appartements et au bâtiment voisin dans la rue Kruggasse 6. Dans ces circonstances, il est logique d'utiliser l'infrastructure existante de la distribution de chaleur et de placer le système de pompe à chaleur dans la partie supérieure du bâtiment. De plus, le sous-sol est occupé et n'offre aucun espace pour installer la technologie nécessaire.

Le grenier a également un petit toit plat, qui sert de balcon commun. Étant donné que le local technique dans le grenier offre peu d'espace, seule une variante split avec l'aéroréfrigérant sur le toit et l'unité de pompe à chaleur intérieure dans le local technique du grenier (solution 4) conviendrait.

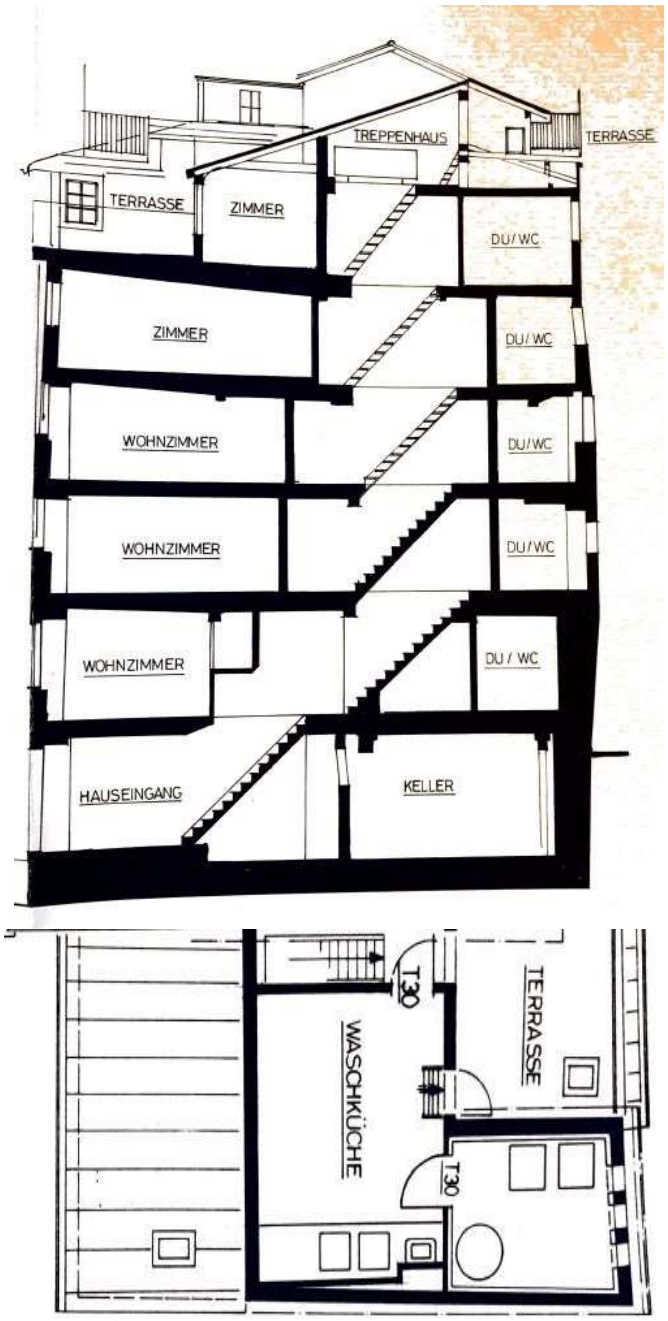


Schéma 170 : Vues en coupe de la rue Kruggasse 8 (source : plans de la rue Kruggasse 8, Office des bâtiments)

10.3.1.3 Puissance de chauffage requise et courbe de chauffage

Le système de chauffage installé dans le local technique de la rue Kruggasse 8 alimente actuellement les bâtiments de la rue Kruggasse 8 et Kruggasse 6 en chaleur et en eau chaude potable. La chaleur étant distribuée et dissipée via des radiateurs, la température de départ maximale est de 60 °C. Une température extérieure de -10 °C est indispensable (voir schéma 171). Le tableau 32 donne un aperçu des besoins énergétiques annuels pour le chauffage et l'eau chaude des deux bâtiments situés à Kruggasse 6 et 8.

Tableau 32 : Besoin en énergie de chauffage, rue Kruggasse 8, état actuel (valeurs mesurées)

Poste	Besoin en énergie annuel
Chauffage à Kruggasse 6 et 8	73 167 kWh/a
Eau chaude à Kruggasse 6	12 720 kWh/a (12 personnes)
Eau chaude à Kruggasse 8	10 600 kWh/a (10 personnes)
Total chauffage et eau chaude	96 590 kWh/a

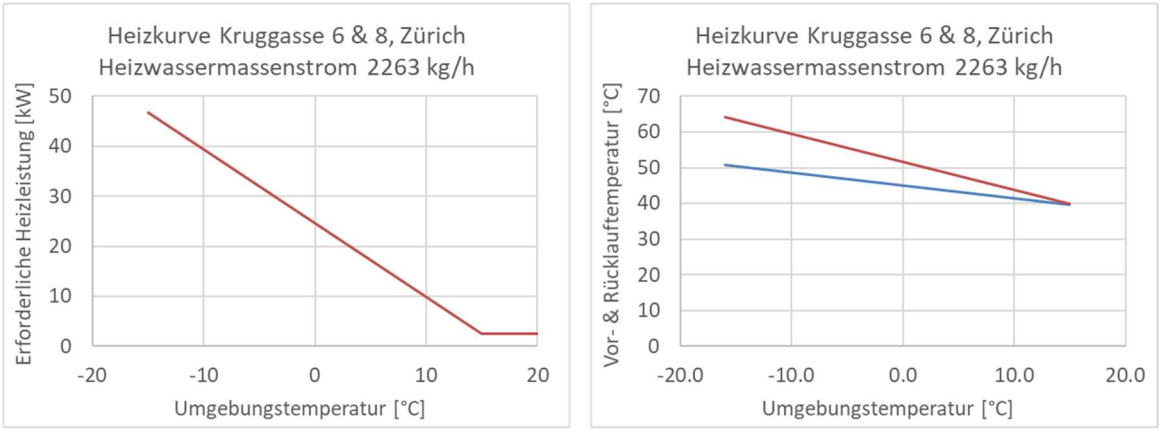


Schéma 171 : Puissance de chauffage et températures de départ/retour requises, état actuel (mesure)

Sur la base de la puissance de chauffage requise du bâtiment, l'influence de la capacité de dimensionnement de la pompe à chaleur ou du mode de fonctionnement de la pompe à chaleur a été examinée (voir tableau 33). Les influences sur la consommation électrique maximale estimée de la pompe à chaleur, sur la part d'énergie thermique renouvelable qui en résulte et la part d'énergie thermique produite par le gaz ont été évaluées. Les éventuels temps d'arrêt de la pompe à chaleur par l'entreprise d'approvisionnement en énergie n'ont pas été pris en compte : un modèle tarifaire correspondant doit être convenu avec le fournisseur d'énergie.

Tableau 33 : Dimensionnement de la puissance de chauffage de la pompe à chaleur air-eau, rues Kruggasse 6 et 8

Puissance du chauffage de la pompe à chaleur @ A-8/W55	Part de la puissance de la pompe à chaleur dans la puissance de crête @ A-8 [%]	Puissance maximale de la chaudière au gaz [kW]	Part du gaz dans l'énergie de chauffage [%]	Part d'énergie de chauffage non renouvelable (électricité : gestion mixte de la ville de Zurich) [%]	Consommation d'énergie maximale approximative de la pompe à chaleur [A]
36,5 kW (2-3 pompes	***100***	***0***	***0***	***2***	***52***

à chaleur)					
15 kW (1 pompe à chaleur)	42	21,5	10	12	19

Fonctionnement parallèle bivalent

Étant donné que l'espace disponible ne permet pas un concept de fonctionnement monovalent et qu'il est techniquement et économiquement plus raisonnable (voir chapitre 10.2), le concept bivalent parallèle est prévu avec une puissance de chauffage de la pompe à chaleur de 15 kW avec des conditions de conception A-8/W55.

- Les spécifications suivantes caractérisent le système de génération de chaleur optimal. La pompe à chaleur doit répondre aux exigences suivantes :
- Puissance de chauffage requise @ A-8/W55 : 15 kW
- Température de départ requise : > 60 °C
- Efficacité : coefficient de performance (COP) idéal @ A-7/W55> 1,8
- Puissance acoustique : < 60 dB (A) (idéalement < 55 dB (A))
- Mode de fonctionnement : bivalent parallèle

Parallèlement à la pompe à chaleur, une chaudière au gaz doit être utilisée pour couvrir les pics de charge en fonctionnement bivalent parallèle. Les spécifications suivantes s'appliquent à la chaudière au gaz à utiliser :

- Puissance de chauffage requise @ A-8/W55 : 21,5 kW
- Séparateur hydraulique intégré

10.3.1.4 Raccordement électrique

Le bâtiment dispose d'une alimentation électrique avec une protection par fusibles de 80 A/400 V AC. D'après les calculs du planificateur électrique (voir l'annexe 17), il y a une réserve de raccordement d'environ 23 kW. De cette manière, un fonctionnement bivalent parallèle avec une pompe à chaleur de 15 kW serait réalisable sans renfort de raccordement.

10.3.1.5 Solutions appropriées, étude de projets

En utilisant la matrice des variantes, il peut être déterminé que seule la solution 3 – Installation dans le grenier – version compacte, est adaptée (voir schéma 172). Comme cela ne laisse pas d'espace dans le grenier, seule la variante split inadaptée en réalité peut être prise en compte, ce qui correspond à la solution 4 - Installation sur le toit – version split.

Schéma 172 : Matrice des variantes, rue Kruggasse 8, solution 4

Le schéma 173 montre comment la disposition de la solution 4, installation de la pompe à chaleur sur un toit – version split, peut être mise en œuvre à Kruggasse 8.

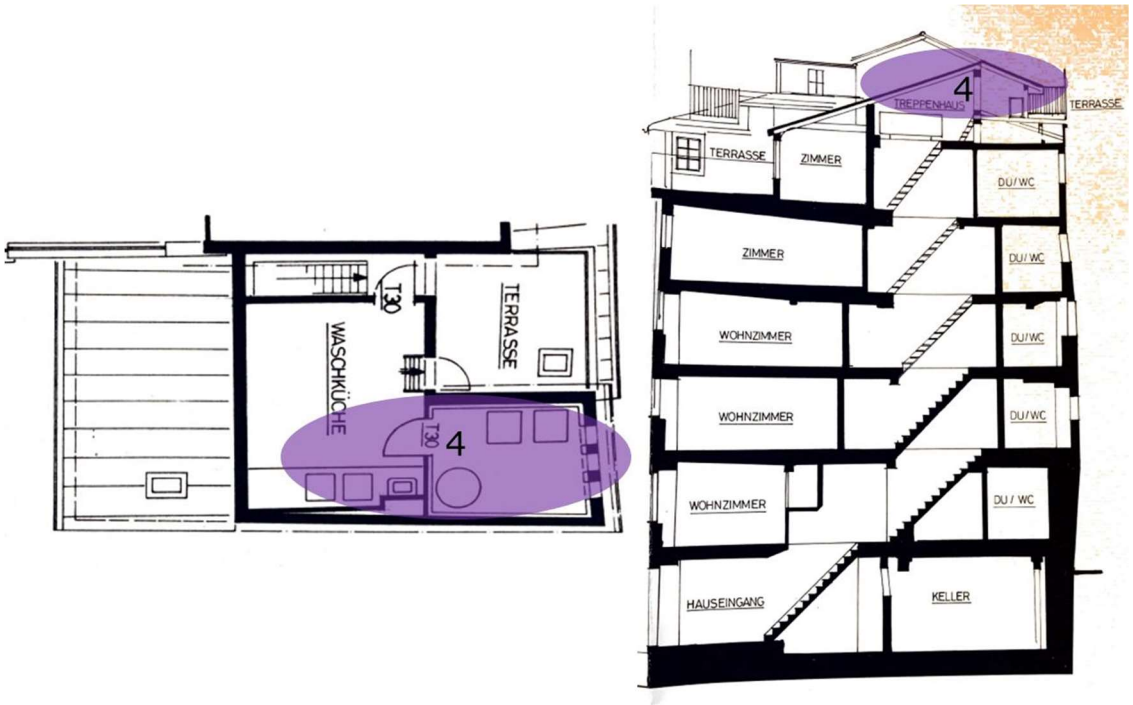


Schéma 173 : Disposition de la solution possible à Kruggasse 8

10.3.2 Étude de projets, solution 4 - Installation sur le toit, version split

10.3.2.1 Fonctionnement et dimensionnement de la puissance de chauffage de la pompe à chaleur

Étant donné que le bâtiment est actuellement équipé d'un chauffage au gaz, un fonctionnement bivalent parallèle de la pompe à chaleur en combinaison avec un chauffage au gaz serait une option. La conception bivalente de la pompe à chaleur pourrait fournir la puissance de chauffage requise et donc également les dimensions de la pompe à chaleur considérablement réduit et donc faciliter l'installation de la pompe à chaleur. La solution 4 dans la rue Kruggasse 8, en tenant compte de la spécification requise au chapitre 10.3.1.3, est prévue avec le dispositif divisé WPL 44 (1 pièce) de Stiebel-Eltron :

- Capacité de chauffage @ A-8/W55 : 17 kW
- Température de départ maximale : 65 °C @ A-10
- Efficacité : COP @ A-7/W55 2,6, COP @ A2/W35 4,2
- Puissance sonore à l'intérieur : 56 dB (A)
- Puissance sonore à l'extérieur : 58 dB (A)
- Protection par fusibles : 25 A (« retardé »)
- Courant de démarrage : 49 A
- Poids intérieur : 160 kg
- Poids extérieur : 175 kg
- Dimensions intérieures : LxHxP 0,6x1,15x0,65 m
- Dimensions extérieures : LxHxP 2,2x1,1x1 m

Schéma 174 : Pompe à chaleur air-eau split de Stiebel-Eltron (Source : Stiebel-Eltron)

La chaudière murale à gaz Junkers Cerapur 9000iW 30 est utilisée pour assurer un fonctionnement bivalent :

- Capacité de chauffage : 3 - 31 kW
- Protection : monophasée 6 A
- Niveau de puissance sonore : 51 dB (A)
- Poids : 148 kg
- Dimensions : LxHxP 0,6x0,7x0,4 m

Schéma175 : Chaudière à gaz Junkers Cerapur (source : Meier Tobler AG)

10.3.2.2 Installation de la pompe à chaleur

Les schémas ci-dessous illustrent l'installation de la pompe à chaleur, des unités intérieure et extérieure ainsi que du ballon de stockage et de la chaudière à gaz à l'échelle.

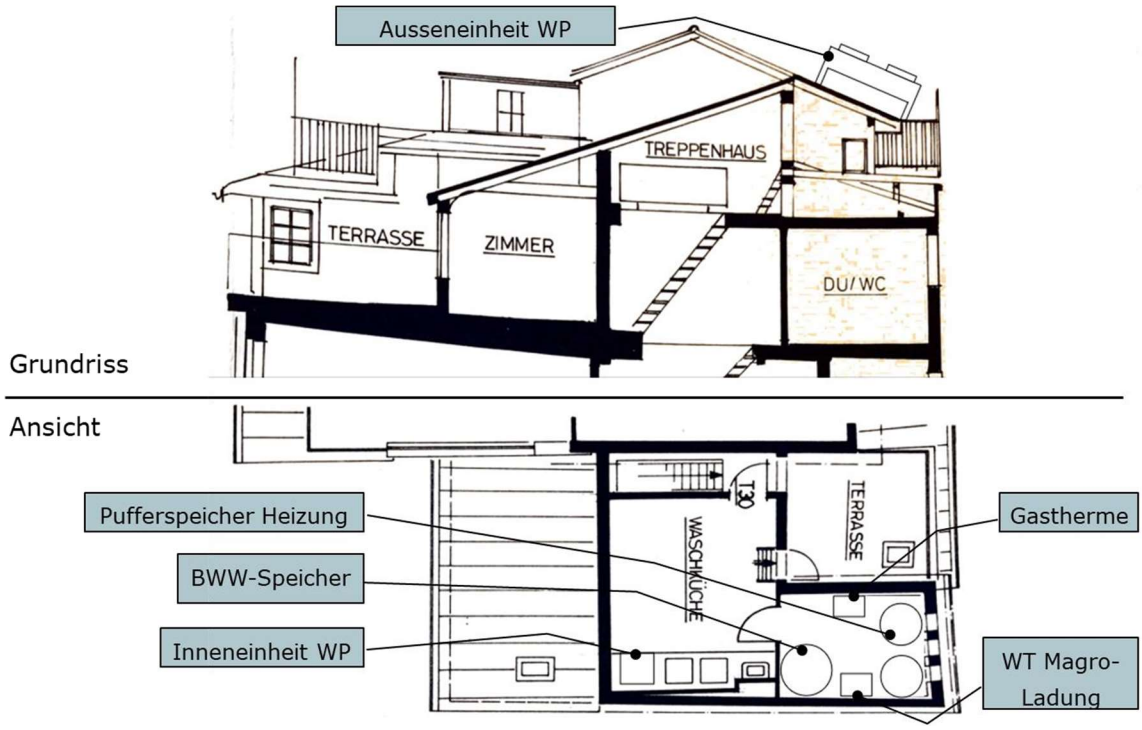


Schéma 176 : Disposition Kruggasse 8, installation en deux parties sur le toit

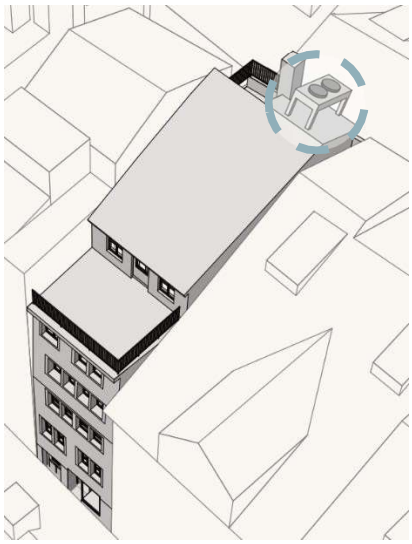


Schéma 177 : visualisation 3D, Kruggasse 8, unité split, installation extérieure sur un toit en pente

10.3.2.3 Preuve de la protection contre le bruit

Pour que la preuve de la protection contre le bruit soit satisfaite et que le projet puisse être approuvé, une distance minimale par rapport au lieu de réception le plus proche doit être maintenue en fonction du niveau de puissance acoustique et de l'emplacement de l'objet source. Dans le schéma 178 suivant, cela est décrit comme le point de réception 1 et la liste ci-jointe montre les paramètres sélectionnés ainsi que les corrections de niveau qui ont été utilisées pour la preuve de la protection contre le bruit (d'après la preuve de la protection contre le bruit : Bureau de génie civil du canton de Zurich [17]).

- Niveau de puissance sonore : 58 dB (A)
- Niveau de sensibilité : III (50 dB (A))
- Point réception 1 : propre bâtiment
- Installation : pompe à chaleur sur pied (+3 dB)
- Correction de niveau K1 : fonctionnement de nuit +10 dB
- Correction de niveau K2 : à peine audible + 2 dB
- Correction de niveau K3 : à peine audible + 2 dB
- Niveau d'évaluation du point de réception 1 : 50 dB (A)

Une installation extérieure de la pompe à chaleur air-eau envisagée est soumise à approbation, car le niveau d'évaluation à l'emplacement de réception est inférieur ou égal au niveau de puissance acoustique admissible selon le niveau de sensibilité concerné.

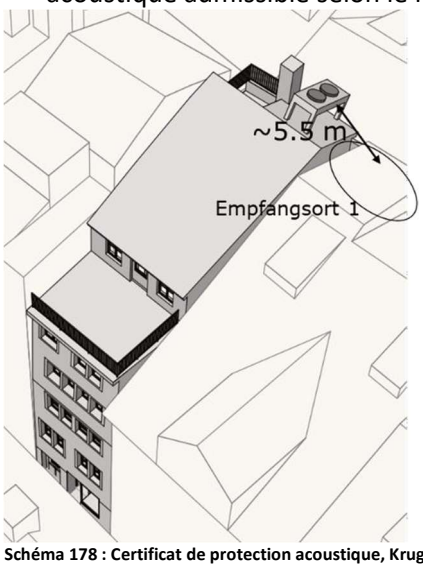


Schéma 178 : Certificat de protection acoustique, Kruggasse 8

10.3.2.4 Intégration hydraulique et concept de réglage

Le schéma hydraulique selon la Schéma 179 (voir également l'annexe 18) montre comment la pompe à chaleur split est intégrée en combinaison avec la chaudière à gaz. L'unité externe de la pompe à chaleur se trouve sur le toit, la chaudière à gaz et le ballon de stockage dans la chaufferie du grenier et l'unité interne de la pompe à chaleur dans la buanderie à côté. La pompe à chaleur peut chauffer l'eau de chauffage et faire fonctionner les circuits de chauffage ou, lors de la commutation, traiter l'eau chaude. Dans le même temps, la chaudière à gaz est intégrée via un interrupteur hydraulique pour soutenir l'apport de chaleur du système de chauffage. Il n'est pas possible d'utiliser la chaudière à gaz pour chauffer de l'eau. Un élément chauffant électrique est prévu dans le réservoir d'eau chaude pour le fonctionnement d'urgence de la préparation d'eau chaude.

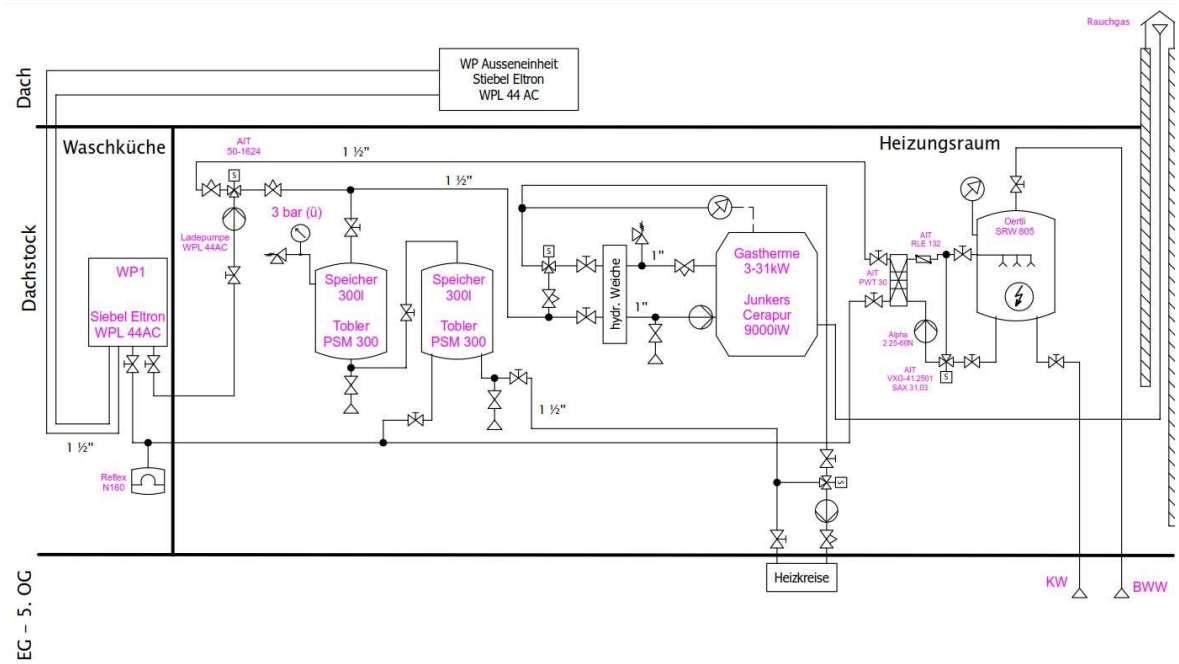


Schéma 179 : Schéma hydraulique, Kruggasse 8, solution 4

10.3.2.5 Mesures structurelles

La mise en œuvre du concept envisagé nécessite un grand nombre de mesures structurelles. Ce sont en détail :

- Démantèlement et élimination des systèmes de chauffage existants
- Mesures structurelles sur la structure du toit pour améliorer la statique dans la zone d'installation des pompes à chaleur (voir Schéma 180 en bleu)
- Installation et montage du support d'installation de l'unité extérieure pompe à chaleur sur le toit
- Introduction et installation de pompes à chaleur

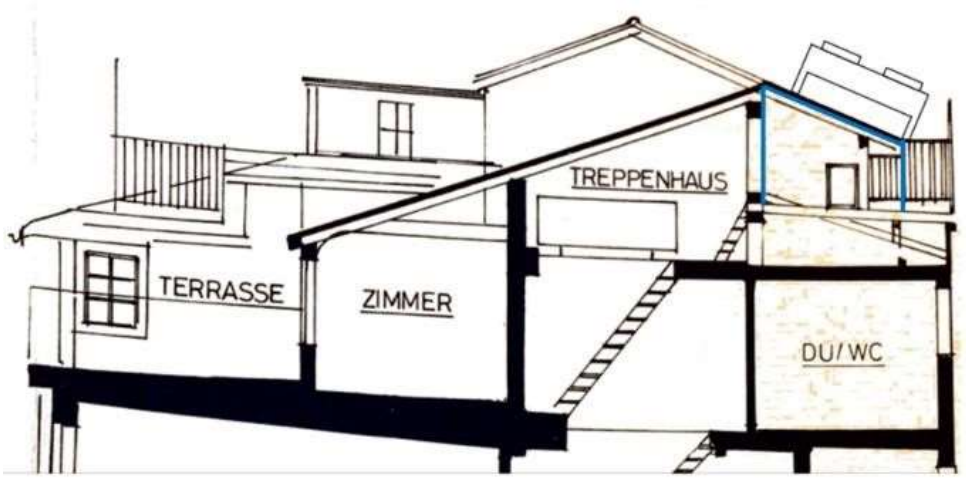


Schéma 180 : Renforcement de la structure du toit, Kruggasse 8

10.3.2.6 Fonctionnement du système

Les schémas ci-dessous montrent le comportement de fonctionnement du système de pompe à chaleur en fonction de la température ambiante. Les courbes de la puissance thermique générée par les pompes à chaleur et le coefficient de performance en mode chauffage COPH sont affichés. Afin de pouvoir évaluer et comparer l'efficacité du système, les performances annuelles correspondantes ont été calculées :

- Coefficient de performance annuel pour le chauffage JAZH : 3,35
- Taux de travail annuel BWW JAZBWW : 3,30
- Coefficient de performance annuel chauffage et JAZges BWW : 3,34

Le calcul tient compte de la distribution horaire de fréquence de la température ambiante à Zurich et de la courbe de chauffe déterminée au paragraphe 10.3.1.3.

La Schéma181 montre la puissance de chauffage générée et requise en fonction de la température ambiante. On constate qu'en dessous de 2 °C de température ambiante, la pompe à chaleur ne peut pas couvrir seule la demande requise et que la chaudière à gaz doit donc la supporter en parallèle. Ce fait peut également être vu dans Schéma183 et Schéma184.

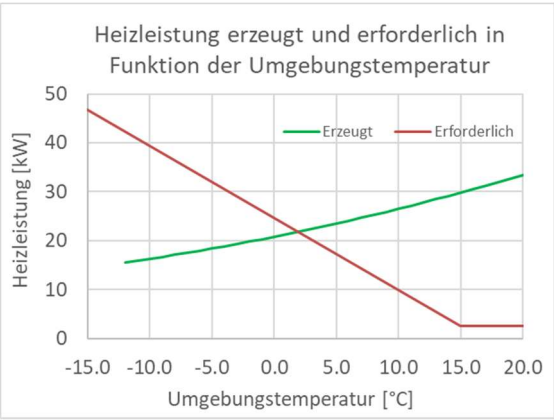


Schéma 181 : Aperçu de la puissance de chauffage nécessaire dans la rue Kruggasse 8 et de la pompe à chaleur de la puissance de chauffage générée, solution 4

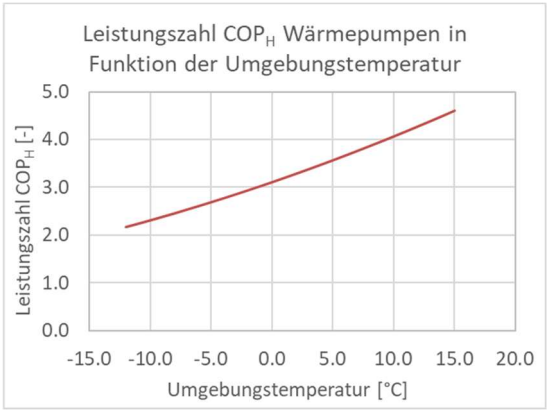


Schéma 182 : Comportement du coefficient de performance (COP) à température ambiante, rue Kruggasse 8, solution 4

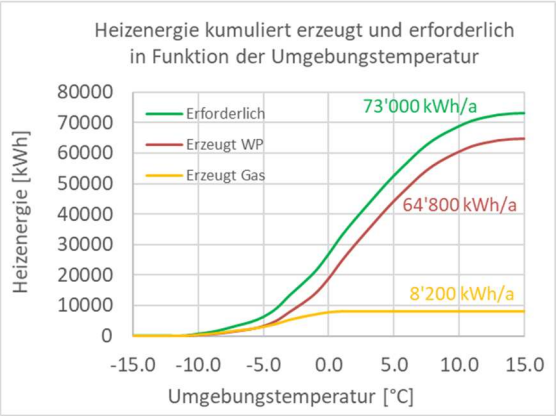


Schéma 183 : Energie de chauffage annuelle à Kruggasse 8, cumulée en fonction de la température extérieure

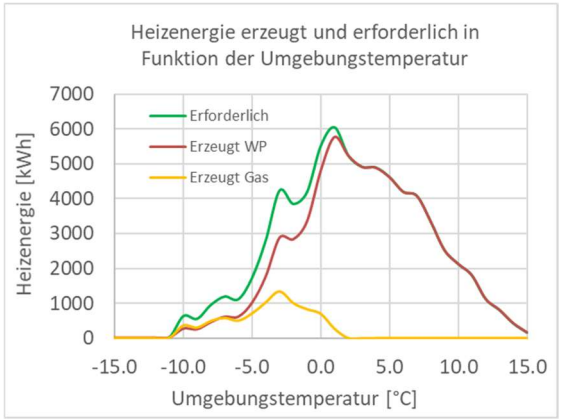


Schéma 184 : Energie de chauffage annuelle à Kruggasse 8, en fonction de la température extérieure

10.3.2.7 Synthèse des coûts

Les unités de coût les plus importantes sont répertoriées ci-dessous. D'une part les coûts d'investissement et d'autre part les coûts annuels. Il convient de mentionner ici que la modernisation du système de distribution et de distribution de chauffage et de distribution d'ECS n'a pas été prise en compte pour l'interprétation des coûts des coûts d'exploitation.
Coûts d'investissement

Les coûts indiqués correspondent au stade de l'étude de faisabilité (+/- 25 %) et sont valables s'ils sont mis en œuvre dans la ville de Zurich. Les coûts d'investissement totaux selon les offres obtenues s'élèvent à 151 500 CHF +/- 25 % (voir tableau 34).

Tableau 34 : Récapitulatif des coûts d'investissement, Kruggasse 8, solution 4

Position	Coûts HT – phase d'étude de faisabilité +/- 25 % [CHF]	Durée d'utilisation [a]	Coûts de maintenance [%]
1. Travaux préparatoires			
1.2 Mesures structurelles du toit : Renforcement du toit	20 000	30	0
plancher à travers des échafaudages à poutres d'acier, y compris le matériel et les travaux			
2. Technique Source de chaleur	500	20	1
2.1 Hottes de protection contre les intempéries : éléments de protection contre les intempéries pour l'unité extérieure de la pompe à chaleur			
3. Approvisionnement énergétique	800	30	2
3.1 Gazoduc : Ajustements au gazoduc, y compris le matériel et les travaux	100	30	2
3.2 Protection contre les gaz : raccords			
4. Génération de chaleur	5 800	20	3

4.2 Pompe à chaleur : Stiebel Eltron WPL 44 AC db avec unité extérieure	34 200	20	4
4.3 Intégration hydraulique de la production de chaleur : pompes, vannes de commutation, séparateur hydraulique, divers accessoires de tuyauteries, travaux, postes 2 à 5	13 700	20	1
4.4 Accumulation de chaleur : chauffage à accumulation tampon, y compris les raccords	3 500	30	1
4.5 Isolation : isolation des tuyaux et des raccords	4 200	30	0
5. Système de cheminée			
5.1 Système de cheminée : système de cheminée matériel	600	20	3
6. Distribution de chaleur			
6.1 Distributeur de chauffage : pompes, mitigeurs, divers raccords, travaux	4 000	30	1
6.2 Expansion : Expansion et groupe de sécurité y compris divers raccords, travaux	2 600	20	1
9. Plomberie			
9.1 Ballon de stockage d'eau chaude : Ballon de stockage d'ECS avec charge Magro avec pompes, vannes, divers raccords et travaux	9 800	20	3
9.2 Distribution : distribution BWW, matériel et travail compris	1 700	40	2
9.3 Isolation : Isolation des tuyaux et des raccords, y compris les matériaux et les travaux	500	30	0
15. MSRL			
15.1 Appareils de terrain : régulateurs et capteurs pour pompes à chaleur	1 000	15	2
15.2 Mise en service : mise en service des pompes à chaleur par les techniciens de service	4 000	15	0
16. Electro			
16.1 Démontage : travaux et élimination	1 000	15	0
16.2 Câblage : matériel électrique et travaux	10 000	20	1
17. Constructeur			
17.1 Travaux de démolition : élimination de l'ancien système de chauffage, travaux et honoraires compris	1 100	20	0
17.2 Installation : installation de la pompe à chaleur par hélicoptère	3 000	20	0
17.3 Travaux de toiture : création d'ouvertures incluant le matériel et les travaux	2 100	20	0
18. Frais			
18.1 Honoraires : ingénieur CVC, ingénieur civil, permis	27 300	20	0
Total des coûts d'investissement	***151 500***		

Coûts annuels

Les coûts annuels qui en résultent ont été déterminés à l'aide de l'outil « Comparaison des variantes - Systèmes énergétiques » du Département de la construction de bâtiments de la ville de Zurich [18]. Les données sous-jacentes sont :

- Taux d'intérêt : 2,5 %
- Période d'observation : 15 ans

La période d'observation est pertinente par rapport à l'augmentation imputée des prix de l'énergie. Les augmentations de prix utilisées dans cette étude se trouvent à l'annexe 20. D'autres données de base, telles que les prix de l'énergie, se trouvent également à l'annexe 20. Les subventions qui peuvent être demandées dans le cadre des subventions de 2000 watts du Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz) sont énumérées à l'annexe 21.

Tableau 35 : Aperçu des coûts annuels à Kruggasse 8, solution 4

Désignation	Montant
Contributions de financement uniques - contributions de 2000 watts Service d'électricité de la ville de Zurich EWZ	9 413 CHF
Coûts énergétiques annuels	8 440 CHF
Coûts de maintenance annuels	1 900 CHF
Coût annuel du capital hors subventions	9 140 CHF
Coûts d'investissement annuels **avec subventions**	8 570 CHF
Coûts annuels totaux hors subventions	19 480 CHF
Coûts annuels totaux **avec subventions**	18 910 CHF
Coûts de production de chaleur hors subventions	20,2 centimes/kWh
Coûts de production de chaleur **avec subventions**	**19,6 centimes/kWh**

10.3.3 Bilan de l'étude de projets rue Kruggasse 8

La comparaison des variantes présentées ci-dessous a été réalisée à l'aide de l'outil « Comparaison des variantes des systèmes énergétiques version 2.2 » de l'Office des bâtiments de la ville de Zurich [18]. Le tableau 18 présente un résumé des repères les plus importants des différentes solutions, qui ont fait l'objet d'un exemple de projet.

Tableau 36 : Comparaison des variantes de Kruggasse 8 avec prise en compte des contributions à la subvention

	Solution 4	Gaz naturel	Biogaz
Coûts d'investissement en CHF, niveau d'étude de faisabilité +/- 25 %	**151 500**	**56 900**	**56 900**
Coût annuel du capital en CHF	8 570	3 470	3 470
Frais de maintenance annuels en CHF	1 900	730	730
Coûts énergétiques annuels en CHF	8 440	9 560	23 290
Coûts annuels totaux en CHF	**18 910**	**13 760**	**27 490**
Demande d'énergie primaire en kWh/a	104 000	121 900	31 700
Énergie primaire non renouvelable en kWh/a	11 500	120 300	26 600
Émissions de gaz à effet de serre en kg/a	2 750	25 970	9 400
Pollution de l'environnement (EP) en points/a	3 450 000	15 740 000	7 080 000
Coûts de production de la chaleur en centime/kWh	**19,6**	**14,3**	**28,5**

La ventilation des coûts des variantes gaz et biogaz est répertoriée à l'annexe 19.

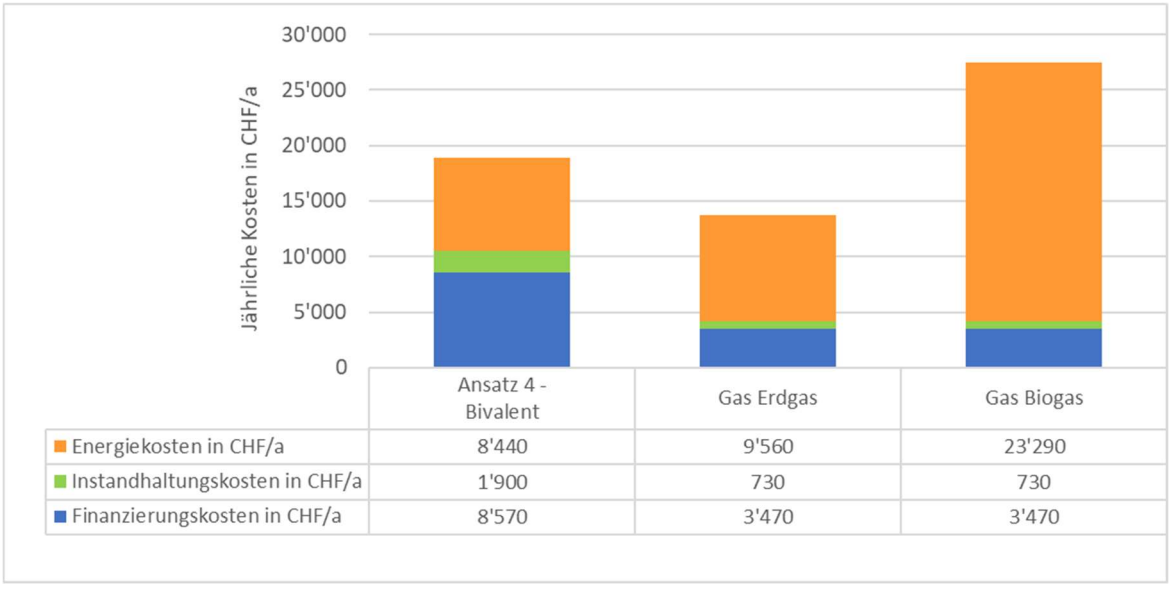
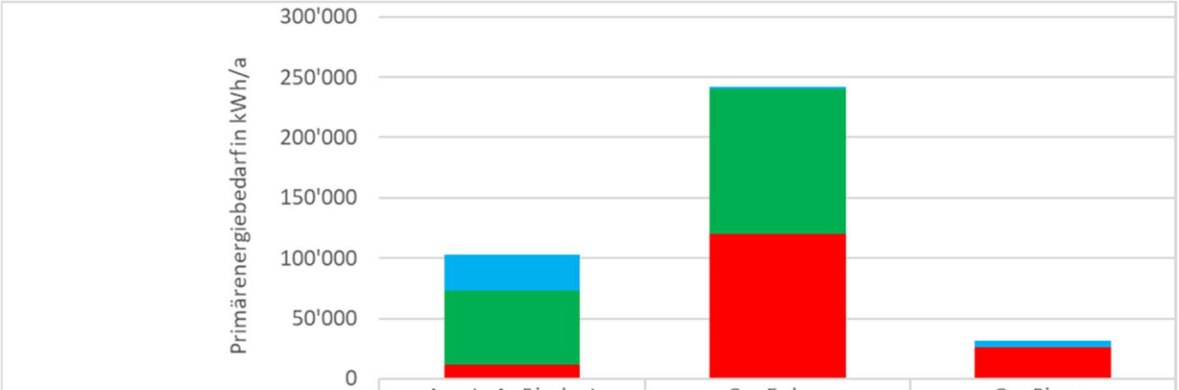


Schéma 185 : Comparaison des variantes Kruggasse 8, coûts annuels avec prise en compte des subventions



	Ansatz 4 - Bivalent	Gas Erdgas	Gas Biogas
Betrieb erneuerbar in kWh/a	29'744	1'135	4'581
Betrieb erneuerbar am Standort in kWh/a	61'810	120'259	0
Primärenergie nicht erneuerbar in kWh/a	11'500	120'300	26'600

Schéma 186 : Comparaison des variantes - demande d'énergie primaire, Kruggasse 8

En raison des conditions d'espace très défavorables à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment de la Kruggasse 8, seule la solution 4 « Installation extérieure sur toiture en pente » a pu être envisagée. La mise en œuvre technique de cette solution nécessite un mode de fonctionnement bivalent-parallèle de la pompe à chaleur en combinaison avec une chaudière à gaz en raison de l'espace disponible.

Les coûts de production de chaleur résultant de la mise en œuvre du système de pompe à chaleur selon la solution 4, en tenant compte des éventuelles contributions aux subventions, sont de l'ordre de 19,6 centimes/kWh. En revanche, les coûts de production de chaleur qui en résultent avec un remplacement de chauffage fossile (chaudière à gaz) sont de l'ordre de 14,3 centimes/kWh.

D'autres discussions, qui ont eu lieu dans le cadre du projet, ont montré que la solution proposée dans les zones centrales est peu susceptible d'être approuvée à l'heure actuelle (en raison de la visibilité).

En vue de fournir une énergie renouvelable, l'utilisation du biogaz pourrait représenter une alternative à l'utilisation des pompes à chaleur air/eau. La mise en œuvre d'une telle solution serait sans problème en termes d'aspects de conservation des monuments. Dans ce contexte, cependant, les projets menés montrent que les coûts de production de chaleur qui en résultent sont plus élevés lors de l'utilisation du biogaz que lors de l'utilisation de pompes à chaleur air/eau. D'un point de vue économique, l'utilisation du biogaz n'est donc pas une alternative intéressante à l'utilisation de pompes à chaleur air/eau.

Liste des schémas

Schéma 1 : Scénario d'efficacité, répartition en pourcentage des systèmes utilisés dans la ville de Zurich en 2050 pour la fourniture de la chaleur thermique et de l'eau chaude. (Source : Rapport de planification de l'approvisionnement en énergie, ville de Zurich [1]) 20
Schéma 2 : Scénario d'efficacité, système de gestion mixte, demande de chaleur/énergie utile de la ville de Zurich pour l'année 2050. (Source : étude « Concept d'approvisionnement énergétique 2050 » de la ville de Zurich [2]) 21
Schéma 3 : Pompe à chaleur air-eau pour une installation intérieure en version compacte avec des conduits de ventilation (source : AIT Schweiz AG) 23
Schéma 4 : Pompe à chaleur air-eau pour une installation extérieure en version compacte (source : IDM-Energiesysteme GmbH) 24
Schéma 5 : Pompe à chaleur air-eau en version split (source : Ochsner Wärmepumpen GmbH) 25
Schéma 6 : Mode de fonctionnement monovalent (source : Viessmann Deutschland GmbH) 26
Schéma 7 : Mode de fonctionnement bivalent parallèle (source : Viessmann Deutschland GmbH) 27
Schéma 8 : Mode de fonctionnement bivalent alternatif (source : Viessmann Deutschland GmbH) 27
Schéma 9 : Mode de fonctionnement bivalent partiellement parallèle (source : Viessmann Deutschland GmbH) 28

Schéma 10 : Évaluation des pompes à chaleur air-eau disponibles standard évaluées. Évaluation valable pour la configuration du système avec une puissance de chauffage de 60 kW à une température ambiante de -7 °C. 33
Schéma 11 : Installation standard - Pompe à chaleur air-eau Glen Dimplex installée à l'extérieur avec capot d'isolation acoustique intégré pour garantir un fonctionnement silencieux, Seon en Suisse (source : Kibernetik AG). 35
Schéma 12 : Installation standard - pompes à chaleur air-eau intérieures et extérieures Oertli, localité inconnue, pompe à chaleur à liaison hydraulique (source : Walter Meier AG). 35
Schéma 13 : Installation standard - pompes à chaleur air-eau extérieures en cascade d'Alpha Innotec de type LWA, en Allemagne (source : ait-deutschland GmbH). 36
Schéma 14 : Installation standard - unité extérieure de la pompe à chaleur split Alera 16XH Super Silence, Neuenkirch en Suisse (source : Alera energies AG). 36
Schéma 15 : Installation standard - unité extérieure de la pompe à chaleur split KNV Greenline LWSE-V24, en Autriche (source : Weichselbaumer GmbH). 36
Schéma 16 : Installation standard - pompes à chaleur air-eau extérieures en cascade de Templari de type KITA, en Italie (source : Templari S.r.l.). 37
Schéma 17 : Installation standard - pompes à chaleur air-eau extérieures en cascade d'IDM de type Terra AL, en Autriche (source : Solar-Info-Zentrum GmbH). 37
Schéma 18 : Installation spécifique - transport d'un évaporateur de table de gros gabarit pour les pompes à chaleur de grande taille avec l'air ambiant comme source de chaleur, localité inconnue (source : CTA AG). 37

Schéma 19 : Installation spécifique - pompe à chaleur air-eau extérieure Unit One d'eta en version monobloc sur le toit d'un immeuble locatif, Affoltern am Albis Suisse (source : eta Group GmbH). 38
Schéma 20 : Concept d'installation de pompe à chaleur air-eau pour les bâtiments anciens classés en milieu urbain. 40
Schéma 21 : Remplacement du chauffage par une pompe à chaleur air-eau standard installée à l'extérieur en version monobloc dans un immeuble ancien classé à Vienne. (Source : IDM Energiesysteme GmbH) 42
Schéma 22 : Installation de pompes à chaleur air-eau extérieures en version compacte sur le toit du bâtiment (source : CSD Ingenieure AG) 43
Schéma 23 : Tuyaux calorifugés avec des conduites d'aller et de retour des pompes à chaleur qui s'étendent devant la façade (source : SIG-eco21). 44
Schéma 24 : Coupe transversale de l'installation de l'aéroréfrigérant de table sous le toit d'une pompe à chaleur air-eau spécifique en version split dans la résidence médicalisée LAK à Mauren, Liechtenstein. (Source : Scheco AG) 45
Schéma 25 : Vue détaillée de la coupe transversale de l'aéroréfrigérant de table sous le toit d'une pompe à chaleur air-eau spécifique en version split dans la résidence médicalisée LAK à Mauren, Liechtenstein. (Source : Scheco AG) 45
Schéma 26 : Esquisse de l'installation de l'aéroréfrigérant de table sous le toit d'une pompe à chaleur air-eau spécifique en version split dans la résidence médicalisée LAK à Mauren, Liechtenstein. (Source : Scheco AG) 46
Schéma 27 : École Geschwister Scholl, pompes à chaleur standard installées au grenier et puits de sortie d'air sur le toit pour l'aération (source : Glen Dimplex Deutschland GmbH) 47
Schéma 28 : Altmarkt-Galerie à Dresde, aéroréfrigérant, installation frigorifique avec et sans protection extérieure contre les regards indiscrets (source : Güntner GmbH & Co. KG.) 48
Schéma 29 : Palais fédéral à Berne, aéroréfrigérant, installation frigorifique montée sous le toit avec une grille de protection extérieure contre les regards indiscrets (source : CTA AG) 49
Schéma 30 : Pompe à chaleur compacte installée à l'extérieur dans le canton de Berne (source : Energie Schweiz) 50
Schéma 31 : Pompe à chaleur compacte installée à l'extérieur, rénovation à bilan énergétique positif dans le canton de Berne (source : Energie Schweiz) 51
Schéma 32 : Pompe à chaleur installée à l'intérieur d'un bâtiment neuf à Turbenthal (source : Energie Schweiz) 51
Schéma 33 : Pompe à chaleur compacte installée à l'intérieur avec de nouveaux puits de lumière, canton de Bâle (source : Energie Schweiz) 52
Schéma 34 : Pompe à chaleur split installée à l'intérieur (source : Energie Schweiz) 52
Schéma 35 : Rue Hofwiesenstrasse 126 - bâtiment avec des combles inoccupés, toit sans proportion de toiture plate, production de chaleur centrale avec distribution de chaleur 57
Schéma 36 : Rue Müllerstrasse 34 - bâtiment avec des combles inoccupés, toit avec balcon accessible sur une proportion de la toiture plate, production de chaleur décentralisée sans distribution de chaleur 58

Schéma 37 : Rue Kruggasse 8 - bâtiment avec des combles partiellement occupés, toit incliné sans proportion de toiture inaccessible, production de chaleur centrale avec distribution de la chaleur 59
Schéma 38 : Part de la production de chaleur de la pompe à chaleur sur le total des besoins en chaleur annuels en fonction de la part de la puissance de chauffage de la pompe à chaleur sur la puissance de chauffage obligatoire du bâtiment à une température de conception de -8 °C 63
Schéma 39 : Solution 1 - Installation d'une pompe à chaleur split (à gauche) ou compacte (à droite) dans le jardin ou à l'extérieur. 65
Schéma 40 : Solution 1 - visualisation de la solution 1 basée sur le bâtiment situé à Hofwiesenstrasse 126, Zurich. 66
Schéma 41 : Solution 2 - installation d'une pompe à chaleur compacte dans une cave. 67
Schéma 42 : Solution 2 - visualisation de la solution 2 basée sur les bâtiments situés à Hofwiesenstrasse 126, Zurich (à gauche) et à Müllerstrasse 34, Zurich (à droite). 68
Schéma 43 : Solution 3 - Installation de la pompe à chaleur en version compacte (à gauche) ou split (à droite) dans le grenier 70
Schéma 44 : Solution 3 - visualisation de la solution 3 basée sur les bâtiments situés à Hofwiesenstrasse 126, Zurich (à gauche) et à Müllerstrasse 34, Zurich (à droite). 71
Schéma 45 : Solution 4 - Installation de pompes à chaleur split sur le toit (unité extérieure) et au sous-sol (unité intérieure) 72
Schéma 46 : Solution 4 - visualisation de la solution 4 basée sur les bâtiments situés à Kruggasse 8, Zurich (à gauche) et à Müllerstrasse 34, Zurich (à droite). 73
Schéma 47 : Solution 5 - Installation d'une pompe à chaleur compacte sur le toit 75
Schéma 48 : Solution 5 - visualisation de la solution 5 basée sur le bâtiment situé à Müllerstrasse 34, Zurich 76
Schéma 49 : Matrice des variantes 78
Schéma 50 : Espace nécessaire aux différentes conceptions de pompe à chaleur en fonction de la puissance nominale de chauffage @ A-7/W55 81
Schéma 51 : Espace nécessaire au réservoir d'accumulation, sections transversales des puits de lumière et sections transversales des conduits de ventilation en fonction de la puissance nominale de chauffage @ A-7/W55 81
Schéma 52 : Niveau de sensibilité I - distance requise entre la source/le récepteur en fonction de la puissance de chauffage nominale @ A-7/W55 82
Schéma 53 : Niveau de sensibilité II - distance requise entre la source/le récepteur en fonction de la puissance de chauffage nominale @ A-7/W55 82
Schéma 54 : Niveau de sensibilité III - distance requise entre la source/le récepteur en fonction de la puissance de chauffage nominale @ A-7/W55 83
Schéma 55 : Niveau de sensibilité IV - distance requise entre la source/le récepteur en fonction de la puissance de chauffage nominale @ A-7/W55 83
Schéma 56 : Vues de rue la Hofwiesenstrasse 126, Zurich 87

Schéma 57 : Vue cartographique de la rue Hofwiesenstrasse 126 avec les bornes de la propriété (source : GIS-Broser ZH [16]) 88
Schéma 58 : Plan du sous-sol de la rue Hofwiesenstrasse 126. (Source : Service d'inspection des constructions en hauteur de Zurich (devenu Office des bâtiments - AHB)) 89
Schéma 59 : Plan du grenier de la rue Hofwiesenstrasse 126 89
Schéma 60 : Coupe transversale du bâtiment situé à Hofwiesenstrasse 126. (Source : Service d'inspection des constructions en hauteur de Zurich (devenu Office des bâtiments - AHB)) 90
Schéma 61 : Puissance de chauffage et températures de départ/retour requises, état actuel (mesure) 90
Schéma 62 : Puissance de chauffage et températures de départ/retour requises, état après rénovation complète (hypothèse) 91
Schéma 63 : Matrice des variantes, rue Hofwiesenstrasse 126 93
Schéma 64 : Sommaire des solutions possibles, rue Hofwiesenstrasse 126 94
Schéma 65 : Pompe à chaleur air-eau d'AIT (source : AIT Schweiz AG) 94
Schéma 66 : Pompe à chaleur air-eau de la société AIT Schweiz AG, dimensions avec capots d'isolation acoustique (source : AIT Schweiz AG) 95
Schéma 67 : Chaudière au fioul à condensation complète (source : Meier Tobler AG) 95
Schéma 68 : Plan sommaire du sous-sol, solution 1, rue Hofwiesenstrasse 126 96
Schéma 69 : Vue sommaire, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 1 96
Schéma 70 : Visualisation 3D, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 1 97
Schéma 71 : Preuve de la protection contre le bruit, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 1 (source : GIS-Broser ZH [16]) 97
Schéma 72 : Intégration hydraulique, solution 1, rue Hofwiesenstrasse 126 98
Schéma 73 : Aperçu de la puissance de chauffage requise dans la rue Hofwiesenstrasse 126 et de la puissance de chauffage générée par la ou les pompes à chaleur, solution 1 99
Schéma 74 : Comportement du coefficient de performance (COP) à température ambiante dans la rue Hofwiesenstrasse 126, solution 1 99
Schéma 75 : Énergie de chauffage annuelle dans la rue Hofwiesenstrasse 126, accumulée en fonction de la température extérieure, solution 1 99
Schéma 76 : Énergie de chauffage annuelle dans la rue Hofwiesenstrasse 126, en fonction de la température extérieure, solution 1 99
Schéma 77 : Pompe à chaleur air-eau Alpha Innotec (source : Alpha Innotec AG) 103
Schéma 78 : Chaudière à condensation complète SK20, (source : Meier Tobler AG) 103
Schéma 79 : Plan sommaire du sous-sol de la rue Hofwiesenstrasse 126, état actuel (source : Service d'inspection des constructions en hauteur de Zurich (devenu Office des bâtiments - AHB)) 104

Schéma 80 : Plan sommaire du sous-sol de la rue Hofwiesenstrasse 126, après rénovation, solution 2 104
Schéma 81 : Disposition du sous-sol, rue Hofwiesenstrasse 126, coupe après rénovation, solution 2 105
Schéma 82 : Visualisation 3D, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 2 105
Schéma 83 : Preuve de la protection contre le bruit dans la rue Hofwiesenstrasse 126, solution 22 105
Schéma 84 : Intégration hydraulique, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 2 106
Schéma 85 : Aperçu de la puissance de chauffage requise de la rue Hofwiesenstrasse 126 et de la puissance de chauffage générée par la ou les pompes à chaleur, solution 2 107
Schéma 86 : Comportement du coefficient de performance (COP) à température ambiante, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 2 107
Schéma 87 : Énergie de chauffage annuelle, rue Hofwiesenstrasse 126, accumulée en fonction de la température extérieure, solution 2 107
Schéma 88 : Énergie de chauffage annuelle, rue Hofwiesenstrasse 126, en fonction de la température extérieure, solution 2 107
Schéma 89 : Pompe à chaleur air-eau Glen Dimplex (source : Walter Meier AG) 111
Schéma 90 : Chaudière au fioul à condensation pleine (source : Meier Tobler AG) 111
Schéma 91 : Plan sommaire du sous-sol, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 3 112
Schéma 92 : Disposition au grenier, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 3 112
Schéma 93 : Visualisation 3D, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 3 113
Schéma 94 : Preuve de la protection contre le bruit, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 3 113
Schéma 95 : Intégration hydraulique, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 3 114
Schéma 96 : Renforcement du grenier, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 3 115
Schéma 97 : Aperçu de la puissance de chauffage requise dans la rue Hofwiesenstrasse 126 et de la ou des pompes à chaleur produites, solution 3 115
Schéma 98 : Comportement du coefficient de performance (COP) à température ambiante, Hofwiesenstrasse 126, solution 3 115
Schéma 99 : Énergie de chauffage annuelle dans la rue Hofwiesenstrasse 126, cumulée en fonction de la température extérieure, solution 3 116
Schéma 100 : Énergie de chauffage annuelle dans la rue Hofwiesenstrasse 126 en fonction de la température extérieure, solution 3 116
Schéma 101 : Comparaison des variantes dans la rue Hofwiesenstrasse 126, coûts annuels en tenant compte des subventions 119
Schéma 102 : Comparaison des variantes dans la rue Hofwiesenstrasse 126, besoin en énergie primaire 120
Schéma 103 : Vues de la Müllerstrasse 34 121
Schéma 104 : Coupe transversale de la rue Müllerstrasse 34 (source : Service immo ville de Zurich) 122

Schéma 105 : Puissance de chauffage et températures de départ/retour requises, hypothèse actuelle en cas d'installation du système de dissipation de chaleur 123
Schéma 106 : Matrice des variantes, rue Müllerstrasse 34 125
Schéma 107 : Sommaire des solutions, rue Müllerstrasse 34 126
Schéma 108 : Pompe à chaleur air-eau Alpha Innotec (source : Alpha Innotec AG) 127
Schéma 109 : Chaudière au gaz murale Junkers (source : www.junkers.com) 127
Schéma 110 : Plan sommaire du sous-sol, rue Müllerstrasse 34, solution 2 mode bivalent 128
Schéma 111 : Vue de la rue Müllerstrasse 34, solution 2 mode bivalent 128
Schéma 112 : Visualisation 3D, rue Müllerstrasse 34, solution 2 mode bivalent 129
Schéma 113 : Preuve de la protection acoustique à la Müllerstrasse 34, solution 2 bivalente 129
Schéma 114 : Intégration hydraulique, Müllerstrasse 34, solution 2 bivalente 130
Schéma 115 : Aperçu de la puissance thermique requise Müllerstrasse 34 et de la puissance thermique générée pompe à chaleur, solution 2 bivalente 131
Schéma 116 : Comportement du COP à température ambiante Müllerstrasse 34, solution 2 bivalente 131
Schéma 117 : Energie de chauffage annuelle Müllerstrasse 34, cumulée en fonction de la température extérieure, solution 2 bivalente 131
Schéma 118 : Energie calorifique annuelle à la Müllerstrasse 34, en fonction de la température extérieure, solution 2 bivalente 131
Schéma 119 : Unité extérieure spéciale L/W-WP de Viessmann (source : Viessmann AG) 135
Schéma 120 : Chaudière à gaz murale Junkers (source : www.junkers.com) 135
Schéma 121 : Vues extérieures, Müllerstrasse 34, solution 4 bivalente 136
Schéma 122 : Plan d'étage Disposition, Müllerstrasse 34, solution 4 bivalente 136
Schéma 123 : Visualisation 3D, Müllerstrasse 34, solution 4 bivalente 137
Schéma 124 : Preuve de la protection acoustique à la Müllerstrasse 34, solution 4 bivalente 137
Schéma 125 : Intégration hydraulique, Müllerstrasse 34, solution 4 bivalente 138
Schéma 126 : Renforcement de la structure du toit, Müllerstrasse 34, solution 4 bivalente 139
Schéma 127 : Aperçu de la puissance thermique requise Müllerstrasse 34 et de la puissance thermique produite pompe à chaleur, solution 4 bivalente 139
Schéma 128 : Comportement du COP à température ambiante Müllerstrasse 34, solution 4 bivalente 139
Schéma 129 : Energie de chauffage annuelle Müllerstrasse 34, cumulée en fonction de la température extérieure, solution 4 bivalente 140

Schéma 130 : Energie calorifique annuelle à la Müllerstrasse 34, en fonction de la température extérieure, solution 4 bivalente 140
Schéma 131 : Unité externe spéciale L/W-WP de Viessmann (source : Viessmann AG) 143
Schéma 132 : Vues extérieures, Müllerstrasse 34, solution 4 monovalent 143
Schéma 133 : Plan d'étage Disposition, Müllerstrasse 34, solution 4 monovalente 144
Schéma 134 : visualisation 3D, Müllerstrasse 34, solution 4 monovalente 144
Schéma 135 : Preuve de la protection acoustique à la Müllerstrasse 34, solution 4 monovalente 145
Schéma 136 : Intégration hydraulique, Müllerstrasse 34, solution 4 monovalente 145
Schéma 137 : Renforcement de la structure du toit, Müllerstrasse 34, solution 4 monovalente 146
Schéma 138 : Aperçu de la puissance thermique requise Müllerstrasse 34 et de la puissance thermique générée pompe à chaleur, solution 4 monovalente 147
Schéma 139 : Comportement du COP à température ambiante Müllerstrasse 34, solution 4 monovalente 147
Schéma 140 : Energie calorifique annuelle à la Müllerstrasse 34, cumulée en fonction de la température extérieure, solution 4 monovalente 147
Schéma 141 : Energie calorifique annuelle à la Müllerstrasse 34, en fonction de la température extérieure, solution 4 monovalente 147
Schéma 142 : L/W-WP Alpha Innotec (source : Alpha Innotec AG) 151
Schéma 143 : Chaudière à gaz murale Junkers (source : www.junkers.com) 151
Schéma 144 : Vues extérieures, Müllerstrasse 34, solution 5 bivalente 152
Schéma 145 : Plan d'étage Disposition, Müllerstrasse 34, solution 5 bivalente 152
Schéma 146 : visualisation 3D, Müllerstrasse 34, solution 5 bivalente 153
Schéma 147 : Preuve de la protection acoustique à la Müllerstrasse 34, solution 5 bivalente 153
Schéma 148 : Intégration hydraulique, Müllerstrasse 34, solution 5 bivalente 154
Schéma 149 : Renforcement de la structure du toit, Müllerstrasse 34, solution 5 bivalente 155
Schéma 150 : Aperçu de la puissance thermique requise Müllerstrasse 34 et de la(des) pompe(s) à chaleur de puissance thermique générée, solution 5 bivalente 155
Schéma 151 : Comportement du COP à température ambiante Müllerstrasse 34, solution 5 bivalente 155
Schéma 152 : Energie thermique annuelle Müllerstrasse 34, cumulée en fonction de la température extérieure, solution 5 bivalente 156
Schéma 153 : Energie calorifique annuelle à la Müllerstrasse 34, en fonction de la température extérieure, solution 5 bivalente 156
Schéma 154 : L/W-WP Alpha Innotec (source : Alpha Innotec AG) 159

Schéma 155 : Vue du toit, Müllerstrasse 34, solution 5 monovalente 159
Schéma 156 : Vue extérieure, Müllerstrasse 34, solution 5 monovalente 160
Schéma 157 : Plan d'étage Disposition, Müllerstrasse 34, solution 5 monovalente 160
Schéma 158 : visualisation 3D, Müllerstrasse 34, solution 5 monovalente 161
Schéma 159 : Preuve de la protection acoustique à la Müllerstrasse 34, solution 5 monovalente 161
Schéma 160 : Intégration hydraulique, Müllerstrasse 34, solution 5 monovalente 162
Schéma 161 : Renforcement de la structure du toit, Müllerstrasse 34, solution 5 monovalente 163
Schéma 162 : Aperçu de la puissance thermique requise Müllerstrasse 34 et de la(des) pompe(s) à chaleur de puissance thermique générée, solution 5 monovalente 163
Schéma 163 : Comportement du COP à température ambiante Müllerstrasse 34, solution 5 monovalente 163
Schéma 164 : Energie de chauffage annuelle Müllerstrasse 34, cumulée en fonction de la température extérieure, solution 5 monovalente 164
Schéma 165 : Energie calorifique annuelle à la Müllerstrasse 34, en fonction de la température extérieure, solution 5 monovalente 164
Schéma 166 : Comparaison des variantes à Müllerstrasse 34, coûts annuels avec prise en compte des subventions 168
Schéma 167 : Comparaison des variantes Müllerstrasse 34, demande d'énergie primaire 168
Schéma 168 : Comparaison des émissions de CO2 avec les coûts d'investissement, Müllerstrasse 34169
Schéma 169 : Vues de la Kruggasse 8, Zurich 170
Schéma 170 : Vues en coupe de la Kruggasse 8 (source : Plans Kruggasse 8, Bureau des Bâtiments) 171
Schéma 171 : Puissance de chauffage et températures de départ/retour requises, état actuel (mesure) 172
Schéma 172 : matrice des variantes, Kruggasse 8, solution 4 174
Schéma 173 : Disposition d'une solution possible à Kruggasse 8 175
Schéma 174 : WP split L/W de Stiebel-Eltron (source : Stiebel-Eltron) 175
Schéma 175 : Chaudière à gaz Junkers Cerapur (source : Meier Tobler AG) 176
Schéma 176 : Disposition Kruggasse 8, installation en deux parties sur le toit 176
Schéma 177 : Visualisation 3D, Kruggasse 8, installation extérieure unité split sur toit en pente 177
Schéma 178 : Certificat de protection contre le bruit, Kruggasse 8 177
Schéma 179 : Schéma hydraulique, Kruggasse 8, solution 4 178
Schéma 180 : Renforcement de la structure du toit, Kruggasse 8 179

Schéma 181 : Aperçu de la puissance thermique requise Kruggasse 8 et de la puissance thermique générée pompe à chaleur, solution 4 179
Schéma 182 : Comportement COP à température ambiante Kruggasse 8, solution 4 179
Schéma 183 : Energie de chauffage annuelle à Kruggasse 8, accumulée en fonction de la température extérieure 180
Schéma 184 : Energie de chauffage annuelle à Kruggasse 8, en fonction de la température extérieure 180
Schéma 185 : Comparaison des variantes Kruggasse 8, coûts annuels avec prise en compte des subventions 183
Schéma 186 : Comparaison des variantes - besoin en énergie primaire, Kruggasse 8 184

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résumé des projets pilotes 53
Tableau 2 : Grille morphologique avec les principales caractéristiques des solutions déjà utilisées aujourd'hui pour l'utilisation des pompes à chaleur air/eau en milieu urbain. 54
Tableau 3 : Caractéristiques du bâtiment requises, solution 1 64
Tableau 4 : Caractéristiques du bâtiment requises, solution 2 66
Tableau 5 : Caractéristiques du bâtiment requises, solution 3 68
Tableau 6 : Caractéristiques du bâtiment requises, solution 4 71
Tableau 7 : Caractéristiques du bâtiment requises, solution 5 74
Tableau 8 : Abréviations de la matrice des variantes 78
Tableau 9 : Demande d'énergie de chauffage à la Hofwiesenstrasse 126 à partir d'aujourd'hui (valeurs mesurées) 90
Tableau 10 : Demande d'énergie de chauffage à la Hofwiesenstrasse 126 état après rénovation complète (hypothèses) 91
Tableau 11 : Dimensionnement de la puissance de chauffage L/W-WP, Hofwiesenstrasse 126 92
Tableau 12 : Récapitulatif des coûts d'investissement, Hofwiesenstrasse 126 Solution 1 100
Tableau 13 : Aperçu des coûts annuels à la Hofwiesenstrasse 126, solution 1 102
Tableau 14 : Récapitulatif des coûts d'investissement, Hofwiesenstrasse 126, solution 2 108
Tableau 15 : Aperçu des coûts annuels, Hofwiesenstrasse 126, solution 2 110
Tableau 16 : Récapitulatif des coûts d'investissement, Hofwiesenstrasse 126 Solution 3 116
Tableau 17 : Aperçu des coûts annuels, Hofwiesenstrasse 126, solution 3 118
Tableau 18 : Récapitulatif des coûts compte tenu des subventions, Hofwiesenstrasse 126 119
Tableau 19 : Demande d'énergie de chauffage, Müllerstrasse 34 (hypothèses actuelles) 122
Tableau 20 : Dimensionnement de la puissance thermiqueL/W-WP, Müllerstrasse 34 123
Tableau 21 : Récapitulatif des coûts d'investissement, Müllerstrasse 34, solution 2 bivalente 132
Tableau 22 : Aperçu des coûts annuels à la Müllerstrasse 34, solution 2 bivalente 134
Tableau 23 : Récapitulatif des coûts d'investissement, Müllerstrasse 34, solution 4 bivalente 140
Tableau 24 : Aperçu des coûts annuels, Müllerstrasse 34, solution 4 bivalente 142
Tableau 25 : Récapitulatif des coûts d'investissement, Müllerstrasse 34, solution 4 monovalente 148
Tableau 26 : Aperçu des coûts annuels, Müllerstrasse 34, solution 4 monovalente 150

Tableau 27 : Récapitulatif des coûts d'investissement, Müllerstrasse 34, solution 5 bivalente. 156
Tableau 28 : Aperçu des coûts annuels, Müllerstrasse 34, solution 5 bivalente 158
Tableau 29 : Récapitulatif des coûts d'investissement, Müllerstrasse 34, solution 5 monovalente 164
Tableau 30 : Aperçu des coûts annuels, Müllerstrasse 34, solution 5 monovalente 166
Tableau 31 : Récapitulatif des coûts compte tenu des subventions, Müllerstrasse 34 167
Tableau 32 : Demande d'énergie de chauffage de la Kruggasse8 aujourd'hui (valeurs mesurées) 172
Tableau 33 : Dimensionnement de la puissance thermiqueL/W-WP, Kruggasse 6 et 8 172
Tableau 34 : Récapitulatif des coûts d'investissement, Kruggasse 8, solution 4 180
Tableau 35 : Aperçu des coûts annuels à Kruggasse 8, solution 4 182
Tableau 36 : Comparaison des variantes Kruggasse 8 avec prise en compte des subventions 183
Tableau 37 : Aperçu des fabricants de pompes à chaleur en 2017/18 199

Bibliographie

[1] B. Bébié, F. Schmid, R. Gessler et T. W. Püntener, « Planning report energy supply », Ville de Zurich, Zurich, 2016.

[2] B. Sunarjo, G. Martius, N. Gross, K. Flury et M. Jabok, « Bref rapport sur le concept d'approvisionnement énergétique 2050. Ville de Zurich, Département des entreprises industrielles », Office des bâtiments, Zurich, 2014.

[3] T. Weisskopf et R. Wagner, «Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich», Office for Buildings, Specialist Unit Energy and Building Technology, Zurich, 2014.

[4] G. Zweifel, «SIA 2028, données climatiques pour la physique du bâtiment, l'énergie et la technique du bâtiment», SIA Zurich, Horw, 2010.

[5] Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie, « Règlements types des cantons dans le secteur de l'énergie (MuKEn) », directeurs cantonaux de l'énergie, Berne, 2014.

[6] L. Gasser, I. Wyssen, M. Albert, M. Häusermann, M. Kleingries et B. Wellig, « Efficient air/water heat pump through continues output control », Office fédéral de l'énergie OFEN, projet numéro SI/500 120, 2011.

[7] R. Dott et T. Afjei, « Pompes à chaleur air/eau compatibles avec la ville comme principaux générateurs de chaleur », Environnement et protection de la santé, énergie et durabilité, Zurich, 2014.

[8] P. Hubacher et C. Bernal, « Mesures sur le terrain des pompes à chaleur régulées et des pompes à chaleur à eau chaude », Office fédéral de l'énergie OFEN, Berne, 2015.

[9] G. Steinke, A. Genkinger, R. L. Kobler, R. Dott, T. Afjei, G. Naef et L. Steiner, « Integration of air/water heat pump in an urban context », Université des sciences appliquées du nord-ouest de la Suisse, Muttenz, 2018.

[10] R. Forster et V. Màrton, « Comparaison des villes : pratique actuelle des licences pour les pompes à chaleur air-eau et options d'optimisation pour le canton de Bâle-Ville », Energie Zukunft Schweiz, Bâle/Zurich, 2018.

[11] CSD Ingenieure AG, SIG-éco21, Office fédéral de l'énergie, « Vademecum,« Pompes à chaleur de toiture », guide pratique pour l'installation de pompes à chaleur air-eau de toiture sur les petits et moyens immeubles à appartements, » Office fédéral de l'énergie, 2018.

[12] « www.energie-loesungen.de, » 2018. [En ligne]. Disponible : http : //www.energie-loesungen.de/energie-loesungen/magazine.

[13] Güntner GmbH & Co. KG, « www.guentner.de », [en ligne]. Disponible : https ://www.guentner.de/know-how/referenzen /? tx_guentnerfe_reference [article] = 147 & tx_guentnerfe_reference [action] = show & tx_guentnerfe_reference [controller] = Référence & cHash = d73090e4579b19bc390cbc21171495a6. [Consulté en 2018].

show&tx_guentnerfe_reference[controller]=Reference&cHash=d73090e4579b19bc390cbc21171495a6. [Zugriff am 2018].

[14] CTA AG, « Le CTA assure la fraîcheur au Palais fédéral », CTA Avance, vol. Magazine client de CTA AG, n° 08/2018, 2018.

[15] Suisse Energie, « Rapport final : Remplacement du chauffage par des pompes à chaleur air-eau dans les immeubles d'habitation », Energie Schweiz, 2018.

[16] « GIS-ZH », 18 octobre 2018. [En ligne]. Disponible : http ://maps.zh.ch/.

[17] Règlement de construction de la ville de Zurich, « Règlement de construction et de zonage », ville de Zurich, Zurich, document n° 700 100.

[18] Département du bâtiment de la ville de Zurich, « Département du bâtiment de la ville de Zurich », [En ligne]. Disponible : https ://www.stadt-zuerich.ch/hbd/de/index/hochbau/beratung/energie- gebaeudetechnik/planungshilfe-werkzeuge.html. [Consulté en 2018].

[19] Département du bâtiment du canton de Zurich, « Bureau de génie civil du canton de Zurich », canton de Zurich, [En ligne]. Disponible : https ://tba.zh.ch/internet/baudirektion/tba/de/laerm/laermvorsorge/neuanlagen/waerme pumpen/laermschutzprüfung-private-kontrolle.html # subtitle-content-internet-baudirektion-tba-de-laerm -protection-du-bruit-de-nouveaux-systemes-pompes-a chaleur-Certificat de protection contre le bruit-private-kon. [Consulté en 2018].

Annexes

Annexe 1 : Aperçu des fabricants de pompes à chaleur, à partir de 2017/18 199
Annexe 2 : Calcul de la puissance électrique Hofwiesenstrasse 126, actuellement 202
Annexe 3 : Calcul de la puissance électrique Hofwiesenstrasse 126, renforcée 203
Annexe 4 : Preuve de la protection contre le bruit à la Hofwiesenstrasse 126, solution 1 204
Annexe 5 : Schéma hydraulique Hofwiesenstrasse 126, solution 1 205
Annexe 6 : Schéma hydraulique Hofwiesenstrasse 126, solution 2 206
Annexe 7 : Schéma hydraulique Hofwiesenstrasse 126, solution 3 207
Annexe 8 : Calcul des coûts Hofwiesenstrasse 126, variante d'huile 208
Annexe 9 : Calcul de la puissance électrique Müllerstrasse 34, actuellement 209
Annexe 10 : Calcul de la puissance électrique Müllerstrasse 34, renforcée 210
Annexe 11 : Schéma hydraulique Müllerstrasse 34, solution 2 bivalent 211
Annexe 12 : Schéma hydraulique Müllerstrasse 34, solution 4 bivalent 212
Annexe 13 : Schéma hydraulique Müllerstrasse 34, solution 4 monovalent 213
Annexe 14 : Schéma hydraulique Müllerstrasse 34, solution 5 bivalent 214
Annexe 15 : Schéma hydraulique Müllerstrasse 34, solution 5 monovalent 215
Annexe 16 : Calcul des coûts à la Müllerstrasse 34, variante gaz 216
Annexe 17 : Calcul de la puissance électrique Kruggasse 8, actuellement 218
Annexe 18 : Schéma hydraulique, Kruggasse 8, solution 4 219
Annexe 19 : Calcul des coûts Kruggasse 8, variante gaz et biogaz 220
Annexe 20 : Comparaison des variantes - données de base 221
Annexe 21 : Financement d'un exemple de planification de projet 222

Annexe 1 : Aperçu des fabricants de pompes à chaleur, à partir de 2017/18

Tableau 37 : Aperçu des fabricants de pompes à chaleur en 2017/18

N°	Fabricant	Désignation	Type	Système de réglage
-	-	-	-	-
1	Alpha Innotec	LW310	Installé à l'intérieur, compact	Commande marche/arrêt à 2 niveaux
2	Alpha Innotec	LW 310A	Installé à l'extérieur, compact	Commande marche/arrêt à 2 niveaux
3	Stiebel Eltron	WPL 130 AC	Installé à l'extérieur, séparation du réfrigérant	Contrôle marche/arrêt
4	Heliotherm	Sensor Solid 55	Installé à l'extérieur, séparation du réfrigérant	Régulation de puissance
5	Ochsner	Air 80C(2)	Installé à l'extérieur, séparation du réfrigérant	Contrôle marche/arrêt
6	Vaillant	flexoTHERM VWF 197/4	Installation à l'extérieur, séparation de la saumure	Contrôle marche/arrêt
7	Walter Meier	Oertli LIN 40TE	Installé à l'intérieur, compact	Commande marche/arrêt à 2 niveaux
8	Walter Meier	Oertli LAN 60TU	Installé à l'extérieur, compact	Commande marche/arrêt à 2 niveaux
9	Heim AG	LWsp 2-54 HT	Installé à l'extérieur, séparation du réfrigérant	Commande marche/arrêt à 2 niveaux
10	CTC Giersch	EcoSplit 36SE	Installé à l'extérieur, séparation du réfrigérant	Contrôle marche/arrêt
11	Templari	KITA-L66	Installé à l'extérieur, compact	Régulation de puissance
12	BES Building Energy Solutions	IS-WP LW 150	Installé à l'extérieur, compact	Commande marche/arrêt à 4 niveaux
13	IDM Energiesysteme GmbH	Terra AL 60 Max	Installé à l'extérieur, compact	Commande marche/arrêt à 2 niveaux
14	Hoval Aktiengesellschaft	Belaria dual AR 60	Installé à l'extérieur, compact	Commande marche/arrêt à

				2 niveaux
15	Sapac	Sirocco 40	Installé à l'extérieur, séparation du réfrigérant	Contrôle marche/arrêt
16	Bartl Wärmepumpen	Eco 18 LA TS/HG	Installé à l'extérieur, séparation du réfrigérant	Commande marche/arrêt à 2 niveaux
17	Alera energies	16XH Super Silence	Installation à l'extérieur, séparation de la saumure	Régulation de puissance

N°.	COP @ A-7/W55	Puissance de chauffage @ A-7/W55	COP @ A2/W35	Puissance cal produite @ A2/W35	Dissipation thermique max.	Distance max unité intérieure/extérieure
-	-	kW	-	kW	°C	m
1	2.7 (W50)	23.5 (W50)	3,5	31 (16,8)	60	Installation intérieure
2	2.7 (W50)	23.5 (W50)	3,5	31 (16,8)	60	Installation extérieure
3	-	47 (W35)	3,6	65,1	55 (A-20), 65 (A-10)	16 m (dénivelé 5 m)
4	1.6 (W52)	43 (88 %), ~49 kW (100 %)	4.3 (W37, 54 %)	26 (W37, 54 %)	62 (A0)	
5	pas connu	47 (W35)	3,6	65	55 (A-20), 65 (A-5)	15 m (dénivelé 5 m)
6	pas connu	pas connu	3,7	17	50 (A-22), 65 (A-2)	16 m (dénivelé 5 m)
7	2	23	3,8	29 (17, 50 %)	58	30 m (dénivelé 30 m)
8	2,2	34	3.4 (3,7, 50 %)	50 (26, 50 %)	65	Installation intérieure
9	pas connu	58 (W35)	4,2	71,4	63 (A-2)	Installation extérieure
10	2,7	26,5	3,6	36,4	58	15 m (dénivelé 5 m)
11	2	28	3.8 (50 %)	19 (50 %)	55	12 m
12	pas connu	90 (W35)	3,8	117	55	Installation extérieure
13	pas connu	28,5	3,5	58,25	60	Installation extérieure
14	pas connu	28,5	3,5	58,25	60	Installation extérieure
15	2,4	32,7	pas connu	pas connu	pas connu	Installation extérieure
16	2	25	3,4	33	65	pas connu
17	2,3	15	3,9	8.3 (50 %)	65	pas connu

N°.	Niveau de puissance sonore à l'intérieur	Niveau de puissance sonore à l'extérieur	Dimensions de l'unité extérieure (LxlxH)	Dimensions de l'unité intérieure (LxlxH)	Poids de l'unité extérieure	Poids de l'unité intérieure
-	dB(A)	dB(LwA)	cm	cm	kg	kg
1	68	-	-	126x80x189	-	540
2	-	67	178x126x212	-	573	-
3	76	74	297x129x115	70x59x185	348	305
4	56	58	295x114x151	120x91x170	290	380
5	60	64	2x 222x96x108	68x68x190	348 (2x 180)	305
6	48,1	68	2x 126x120x79	60x60x118		200
7	68	-	-	174x89x210	-	590
8	-	74	190x100x230	-	915	-
9	57	57	308x100x152	130x106x79	339	415
10	57	58	2x 214x95x130	70x75x150	2x 205	290
11	-	60	179x64x152	-	280	-
12	-	75	354x165x183	-	1050	-
13	-	80	150x330x90	-	880	-
14	-	80	150x330x90	-	880	-
15	59	Pas connu	250x110x129	143x55x70	290	286
16	63	60	2 x 100x201x96	130x78x110	300	~305
17	55	48	4x248x109x60	65x75x108	4x 176	120

Annexe 2 : Calcul de la puissance électrique à la Hofwiesenstrasse 126, version courante

ELGI-PLAN GmbH
Hauptstrasse 25
6281 Hochdorf
041 911 04 11
041 911 04 14 (FAX)
info@elgi-plan.ch
www.elgi-plan.ch

ELGI PLAN
INGENIEURBÜRO ELEKTROTECHNIK

Leistungsberechnungen Hofwiesenstrasse 126

	Absicherung		Spannung		Leistung		
Hauptanschluss	63	A	3LN	692	V	43.60	kW
Verbraucher							
Allgemein	20	A	3LN	692	V	13.84	kW
Waschautomat 1	25	A	3LN	692	V	6.00	kW
Waschautomat 2	35	A	3LN	692	V	6.00	kW
Ventilation	35	A	3LN	692	V	5.00	kW
Oelfeuerung	35	A	3LN	692	V	3.00	kW
1.OG links	20	A	2LN	400	V	8.00	kW
1.OG mitte	20	A	2LN	400	V	8.00	kW
1.OG rechts	20	A	2LN	400	V	8.00	kW
2.OG links	20	A	2LN	400	V	8.00	kW
2.OG mitte	20	A	2LN	400	V	8.00	kW
2.OG rechts	20	A	2LN	400	V	8.00	kW
3.OG links	20	A	2LN	400	V	8.00	kW
3.OG mitte	20	A	2LN	400	V	8.00	kW
3.OG rechts	20	A	2LN	400	V	8.00	kW
Total "berechnete" Leistung						105.84	kW
angenommener Gleichzeitigkeitsfaktor						0.40	
Total angenommene Gesamtleistung							
(Totalleistung x Gleichzeitigkeit)						42.34	kW
Total mögliche Reserve für Wärmepumpen						**1.26**	kW
Variante 1:							
1x AIT LW 251 A	25	A	3LN			14.40	kW
1x AIT LW 180 A	20	A	3LN			10.30	kW
Total: Variante 1						24.70	kW -23.44 kW
Variante 2:							
1x AIT LW 380	40	A	3LN			22.00	kW -20.74 kW
Variante 3:							
1x Glend Dimplex LI 24 TES (pro Gerät)	25	A	3LN			6.00	kW
2x Glend Dimplex LI 24 TES						12.00	kW -10.74 kW

Bemerkungen:
- alle Angaben sind als geschätzte Verbraucherwerte anzuschauen
- ebenso ist der angenommene Gleichzeitigkeitsfaktor eine entsprechende Annahme
- eine genaue Berechung kann nur anhang, von am Objekt aufgenommenen Messdaten erfolgen

ELGI-Plan GmbH
Max Gsponer

Hochdorf, 12.12.2018

Annexe 3 : Calcul de la puissance électrique Hofwiesenstrasse 126, renforcée

ELGI-PLAN GmbH
Hauptstrasse 25
6281 Hochdorf
041 911 04 11
041 911 04 14 (FAX)
info@elgi-plan.ch
www.elgi-plan.ch

ELGI PLAN
INGENIEURBÜRO
ELEKTROTECHNIK

Leistungsberechnungen Hofwiesenstrasse 126

	Absicherung		Spannung		Leistung			
Hauptanschluss	100	A	3LN	692	V	69.20	kW	
Verbraucher								
Allgemein	20	A	3LN	692	V	13.84	kW	
Waschautomat 1	25	A	3LN	692	V	6.00	kW	
Waschautomat 2	35	A	3LN	692	V	6.00	kW	
Ventilation	35	A	3LN	692	V	5.00	kW	
Oelfeuerung	35	A	3LN	692	V	3.00	kW	
1.OG links	20	A	2LN	400	V	8.00	kW	
1.OG mitte	20	A	2LN	400	V	8.00	kW	
1.OG rechts	20	A	2LN	400	V	8.00	kW	
2.OG links	20	A	2LN	400	V	8.00	kW	
2.OG mitte	20	A	2LN	400	V	8.00	kW	
2.OG rechts	20	A	2LN	400	V	8.00	kW	
3.OG links	20	A	2LN	400	V	8.00	kW	
3.OG mitte	20	A	2LN	400	V	8.00	kW	
3.OG rechts	20	A	2LN	400	V	8.00	kW	
Total "berechnete" Leistung								105.84 kW
angenommener Gleichzeitigkeitsfaktor								0.40
Total angenommene Gesamtleistung (Totalleistung x Gleichzeitigkeit)								42.34 kW
Total mögliche Reserve für Wärmepumpen								**26.86** kW
Variante 1:								
1x AIT LW 251 A	25	A	3LN			14.40	kW	
1x AIT LW 180 A	20	A	3LN			10.30	kW	
Total: Variante 1						24.70	kW	2.16 kW
Variante 2:								
1x AIT LW 380	40	A	3LN			22.00	kW	4.86 kW
Variante 3:								
1x Glend Dimplex LI 24 TES (pro Gerät)	25	A	3LN			6.00	kW	
2x Glend Dimplex LI 24 TES						12.00	kW	14.86 kW

Bemerkungen:
- alle Angaben sind als geschätzte Verbraucherwerte anzuschauen
- ebenso ist der angenommene Gleichzeitigkeitsfaktor eine entsprechende Annahme
- eine genaue Berechung kann nur anhang, von am Objekt aufgenommenen Messdaten erfolgen

ELGI-Plan GmbH
Max Gsponer

Hochdorf, 12.12.2018

Annexe 4 : Preuve de la protection contre le bruit à la Hofwiesenstrasse 126, solution 1

Lärmschutznachweis Art. 7 Abs. 1 LSV Projektkontrolle	LN-1b	Lärmschutznachweis Wärmepumpe Komplexe Fälle

Beurteilung der Lärmimmissionen von Luft / Wasser-Wärmepumpen (WP) während der Nacht

Gemeinde: Zürich Parz. Nr.: Geb.Nr.:

Bauvorhaben Hofwiesenstrasse 126 - Ersatz Wärmeerzeuger durch L/W-WP

Angaben zur Luft / Wasser-Wärmepumpe (techn. Datenblatt + Situationsplan mit eingezeichneter WP beilegen)
gemäss Euro-Norm EN 255 resp. EN 14511 (siehe auch www.wpz.ch)

Hersteller	Alpha Innotec	Schallleistung L_{wA}	63 dBA	◉ LwA
Modell / Typ	LW180A & LW251A	Schalldruckpegel L_{pA}	dBA	○ LpA
Leistung	30 kW	bei s_1	m	

Aufstellungsart ☐ Innenaufstellung ☑ Aussenaufstellung ☐ Splitbauweise

Schallleistungspegel aussen L_{wA} (Herstellerangaben / Wärmepumpen-Testzentrum www.wpz.ch)	63	63 dBA
Empfangspunkte: EP 1 Eigenes Gebäude / EP 2 Benachbartes Gebäude	Nr 1	Nr 2
Distanz Quelle - Empfangspunkt (bei unüberbauten Nachbarparzellen: Baulinie)	3.7	23 m
Empfindlichkeitsstufe (gemäss Zonenplan)	III	III
Planungswert gemäss Anhang 6 LSV	50	50 dBA

Berechnung des Beurteilungspegels L_r am Empfangspunkt (Immissionsort)

Richtwirkungskorrektur D_c	○ WP im Gebäude, Schacht an der Fassade (+ 6 dB) ○ WP im Gebäude, Schacht in einspringender Fassadenecke (+ 9 dB) ○ WP aussen an der Fassade (+ 6 dB) ○ WP aussen in einspringender Fassadenecke (+ 9 dB) ◉ WP freistehend (+ 3 dB)	3	3 dB
Schalldruckpegel L_{pA} am Empfangsort ($L_{pA} = L_{wA}$-11+D_c -20*log(s))		43.6	27.7 dBA
Pegelkorrektur K1	Heizbetrieb während der Nacht (19:00 - 07:00 Uhr)	10	10 dB
Pegelkorrektur K2	Hörbarkeit der Tonhaltigkeit ○ nicht hörbar ◉ schwach hörbar + 2 dB (Normalfall) ○ deutlich hörbar + 4 dB ○ stark hörbar + 6 dB	2	2 dB
Pegelkorrektur K3	Hörbarkeit der Impulshaltigkeit ○ nicht hörbar (Normalfall: 1-stufiger monovalenter Betrieb) ◉ schwach hörbar + 2 dB (2-stufiger Betrieb od. Doppelanlage) ○ deutlich hörbar + 4 dB ○ stark hörbar + 6 dB	2	2 dB
Pegelkorr. durch Betriebsdauer t (in der Regel: t = 720 Min)	720 Min.	0.0	0.0 dB
Sicherheits- und Vorsorgezuschlag		3.0	3.0 dB
Lärmschutzmassnahmen	☐ Wetterschutzgitter schallgedämmt (ca. -3 dB) ☐ Lichtschacht (mind. 1,5 m tief, ca. -5 dB) ☑ Andere: Schalldämmhauben -13 ☐ Andere:	-13	-13 dB
Beurteilungspegel $L_{r,n}$		**48**	**32 dBA**

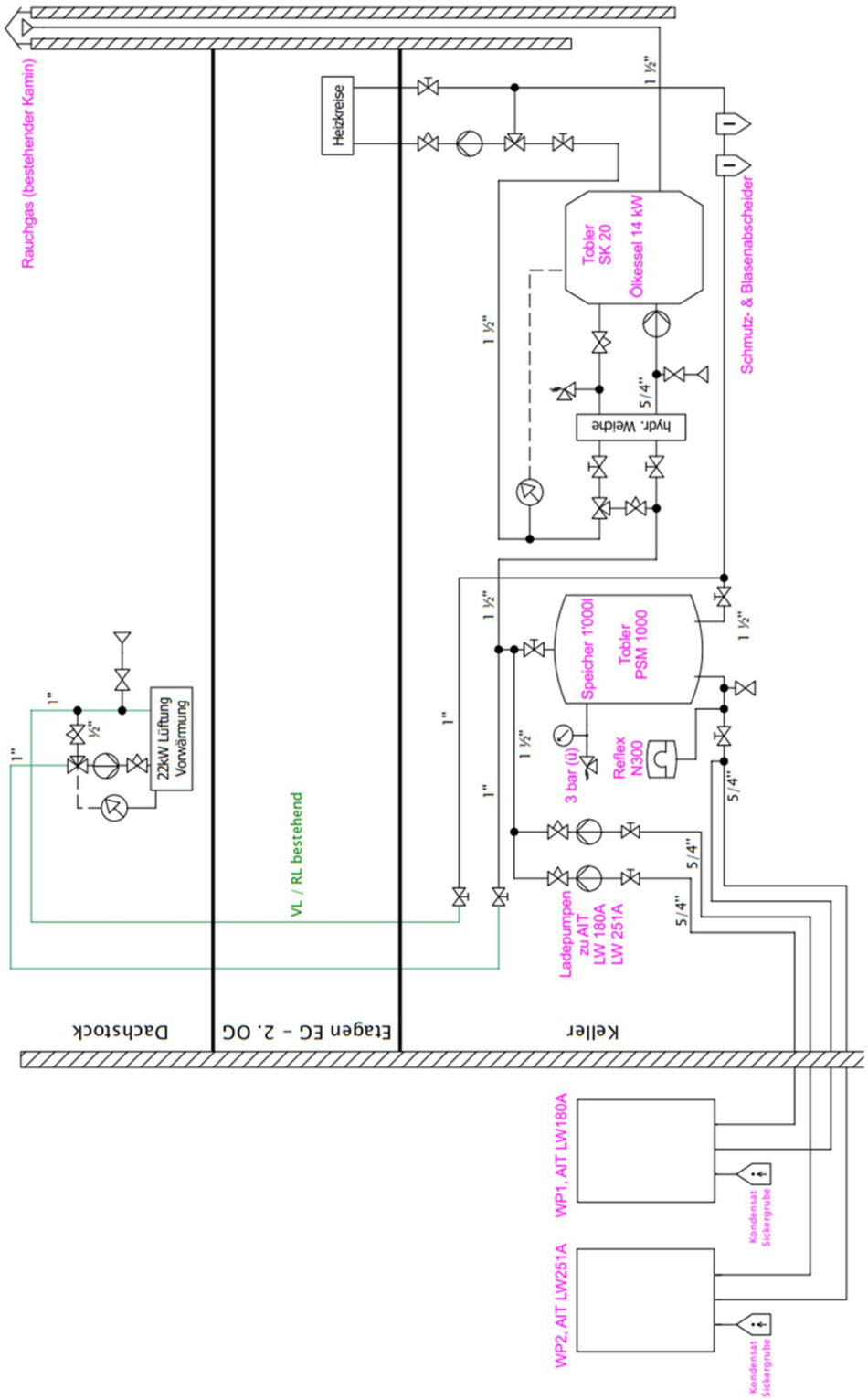
Unterschriften: Projekt erfüllt alle Anforderungen nach LSV Art. 7 Abs.1 (Aussenlärm) und Anforderungen an haustechnische Anlagen (Innenlärm nach SIA 181) nach Art. 32 LSV:

☑ ja ☐ nein

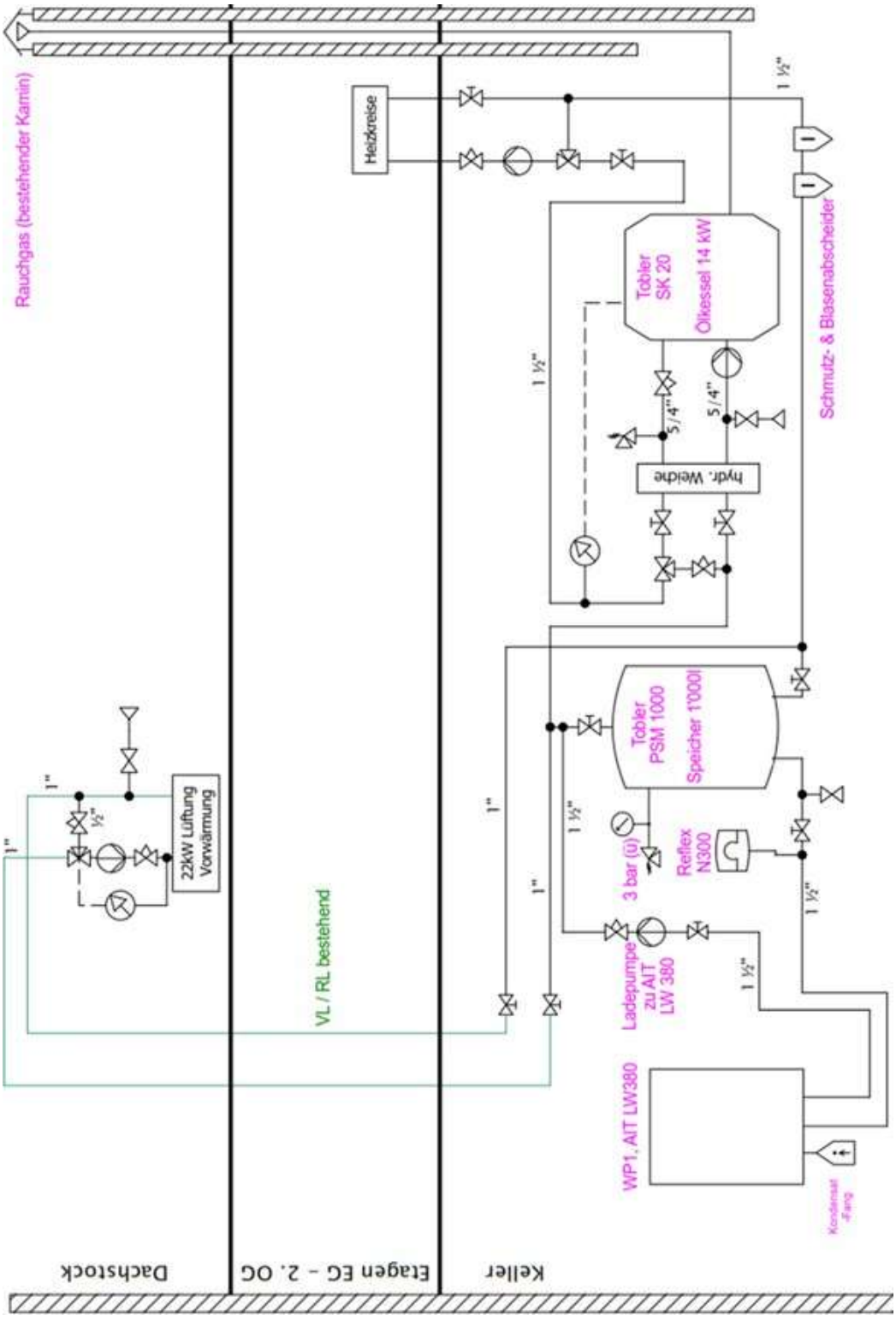
Name und Adresse, bzw. Firmenstempel:		**Private Kontrolle / Nachweisprüfung** (Fachbereich Schutz vor Lärm) Die Vollständigkeit und die Richtigkeit bescheinigt:
Sachbearbeiter/ in, Tel.:		
Ort, Datum, Unterschrift:		Ausführungskontrolle: ☐ gleiche Person oder:

Formular WP Seite 1 von 1 LN-1a_150811.xltx Version vom 11.08.2015

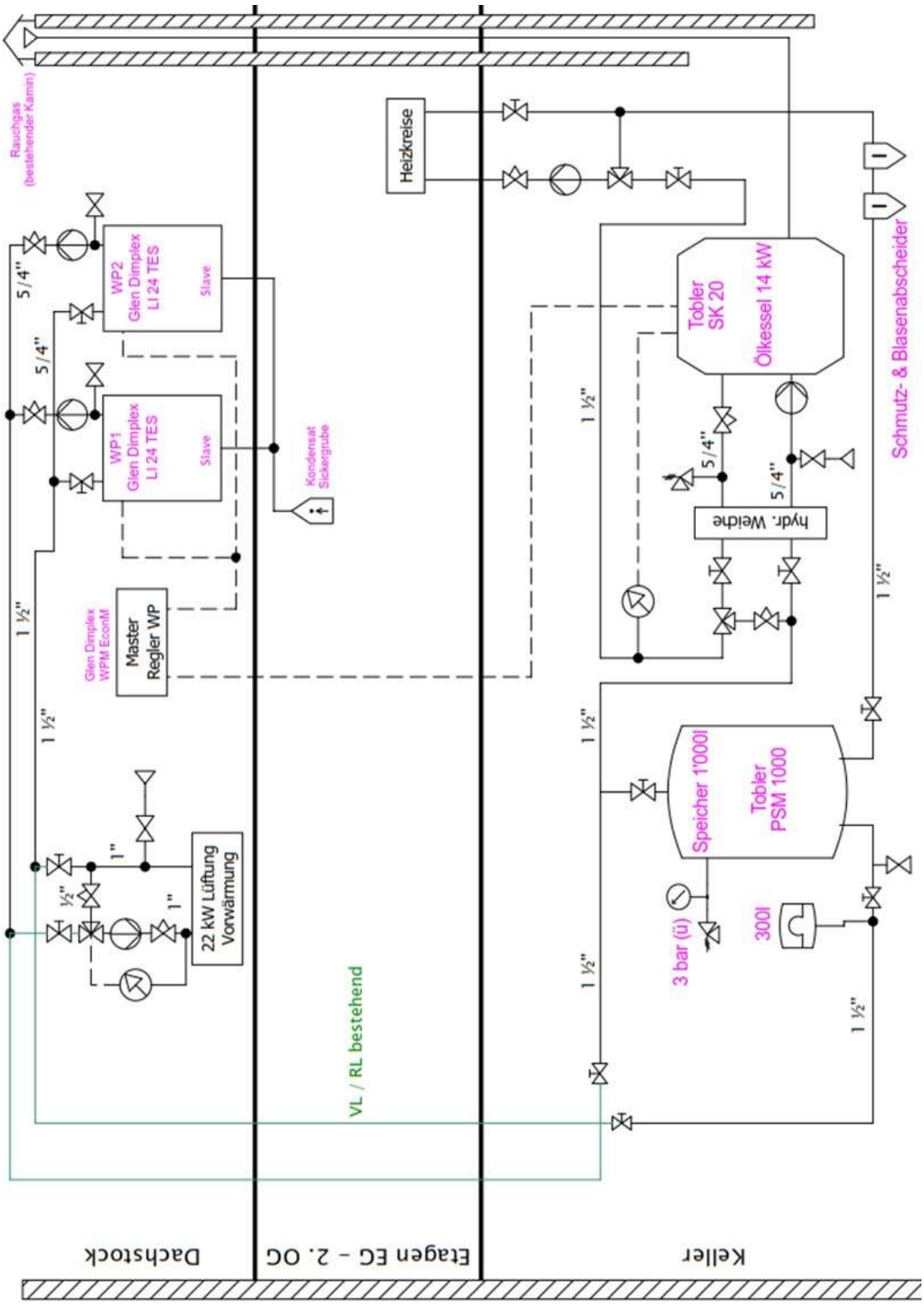
Annexe 5 : Schéma hydraulique, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 1



Annexe 6 : Schéma hydraulique, Hofwiesenstrasse 126, solution 2



Annexe 7 : Schéma hydraulique, rue Hofwiesenstrasse 126, solution 3



Annexe 8 : Calcul des coûts à la Hofwiesenstrasse 126, variante fioul

Position	Coûts HT – phase étude de faisabilité +/- 25 % [CHF]	Durée d'utilisation [a]	Coûts de maintenance [%]
1. Travaux préparatoires			
1.2 Site d'installation des travaux de jardinage WP : Creusement de conduites souterraines, fosse septique, base d'installation de fondation en béton	7 600	30	0,0
2. Technique/source de chaleur			
2.1 Câbles de raccordement : conduites d'eau de chauffage souterraines pose isolée	9 000	30	2,0
2.2 Hottes d'insonorisation pour pompes à chaleur	400	30	1,5
3. Approvisionnement énergétique			
3.1 Réservoir d'huile : nouveau réservoir en plastique	13 100	20	2,5
3.2 Production du fioul	6 000	20	0,5
4. Génération de chaleur	1 400	30	0,0
4.1 Chaudière : chaudière mazout Tobler SK20			
4.2 Pompes à chaleur : L/W-WP AIT LW180A & AIT LW251A	800	20	2,5
4.3 Intégration hydraulique de la production de chaleur : pompes, vannes de commutation, séparateur hydraulique, divers accessoires de tuyauteries, postes 2 à 5			
4.4 Accumulation de chaleur : chauffage à accumulation tampon, y compris les raccords	3 100	30	1,0
6.2 Expansion : Groupe d'expansion et de sécurité comprenant divers raccords, travaux	2 400	20	1,0
15. MSRL			
15.1 Appareils de terrain : capteurs chaudière mazout	100	15	1,5
15.2 Mise en service : mise en service de la chaudière mazout par un technicien SAV	1 400	15	0,0
16. Electro			
16.1 Démontage : travaux et élimination	1 000	15	0,0
16.2 Câblage : matériel électrique et travaux	1 000	20	1,0
17. Travaux auxiliaires			
17.1 Travaux de démolition : élimination du système de chauffage existant, y compris les travaux et les frais	1 000	20	0,0
18. Frais			
18.1 Honoraires : ingénieur HLKKSE, ingénieur civil, permis	5 000	20	0,0
Total	***53 300***		

Annexe 9 : Calcul de la puissance électrique Müllerstrasse 34, version courante

ELGI-PLAN GmbH
Hauptstrasse 25
6281 Hochdorf
041 911 04 11
041 911 04 14 (FAX)
info@elgi-plan.ch
www.elgi-plan.ch

ELGI PLAN
INGENIEURBÜRO ELEKTROTECHNIK

Leistungsberechnungen Müllerstrasse 34

	Absicherung		Spannung		Leistung	
Hauptanschluss	80 A	3LN	692	V	55.36 kW	
Verbraucher						
4.OG rechts	16 A	2LN	400	V	6.40 kW	
4.OG links	16 A	2LN	400	V	6.40 kW	
3.OG rechts	16 A	1LN	230	V	3.68 kW	
3.OG links	16 A	1LN	230	V	3.68 kW	
EG rechts (Büro)	16 A	3LN	692	V	11.07 kW	
Wärme allg.	16 A	2LN	400	V	6.40 kW	
2.OG rechts	16 A	1LN	230	V	3.68 kW	
2.OG links	16 A	1LN	230	V	3.68 kW	
Licht Allgemein	16 A	1LN	230	V	3.68 kW	
1.OG rechts	16 A	1LN	230	V	3.68 kW	
1.OG links	16 A	2LN	400	V	6.40 kW	
Rundsteuerempfänger	10 A	1LN	230	V	0.10 kW	
EG links (Coiffeur)	25 A	2LN	400	V	10.00 kW	
EG mitte	16 A	1LN	230	V	3.68 kW	
Waschautomat 1	10 A	3LN	692	V	6.92 kW	
Tumbler 2	10 A	3LN	692	V	6.92 kW	
Total "berechnete" Leistung						86.37 kW
angenommener Gleichzeitigkeitsfaktor						0.40
Total angenommene Gesamtleistung (Totalleistung x Gleichzeitigkeit)						34.55 kW
Total mögliche Reserve für Wärmepumpen						**20.81** kW
Variante 1:						
1x AIT LW 380	40 A	3LN			22.00 kW	-1.19 kW
Variante 5.1:						
1x AIT LW 251 A	25 A	3LN			14.40 kW	
1x AIT LW 180 A	20 A	3LN			10.30 kW	
Total: Variante 5.1					24.70 kW	-3.89 kW
Variante 5.2:						
1x AIT LW 310 A (pro Gerät)	32 A	3LN			16.80 kW	
3x AIT LW 310 A					50.40 kW	-29.59 kW

Bemerkungen:
- alle Angaben sind als geschätzte Verbraucherwerte anzuschauen
- ebenso ist der angenommene Gleichzeitigkeitsfaktor eine entsprechende Annahme
- eine genaue Berechung kann nur anhang, von am Objekt aufgenommenen Messdaten erfolgen

ELGI-Plan GmbH
Max Gsponer

Hochdorf, 12.12.2018

Annexe 10 : Calcul de la puissance électrique Müllerstrasse 34, renforcée

ELGI-PLAN GmbH
Hauptstrasse 25
6281 Hochdorf

041 911 04 11
041 911 04 14 (FAX)

info@elgi-plan.ch
www.elgi-plan.ch

ELGI PLAN
INGENIEURBÜRO
ELEKTROTECHNIK

Leistungsberechnungen Müllerstrasse 34_Variante mit 100A

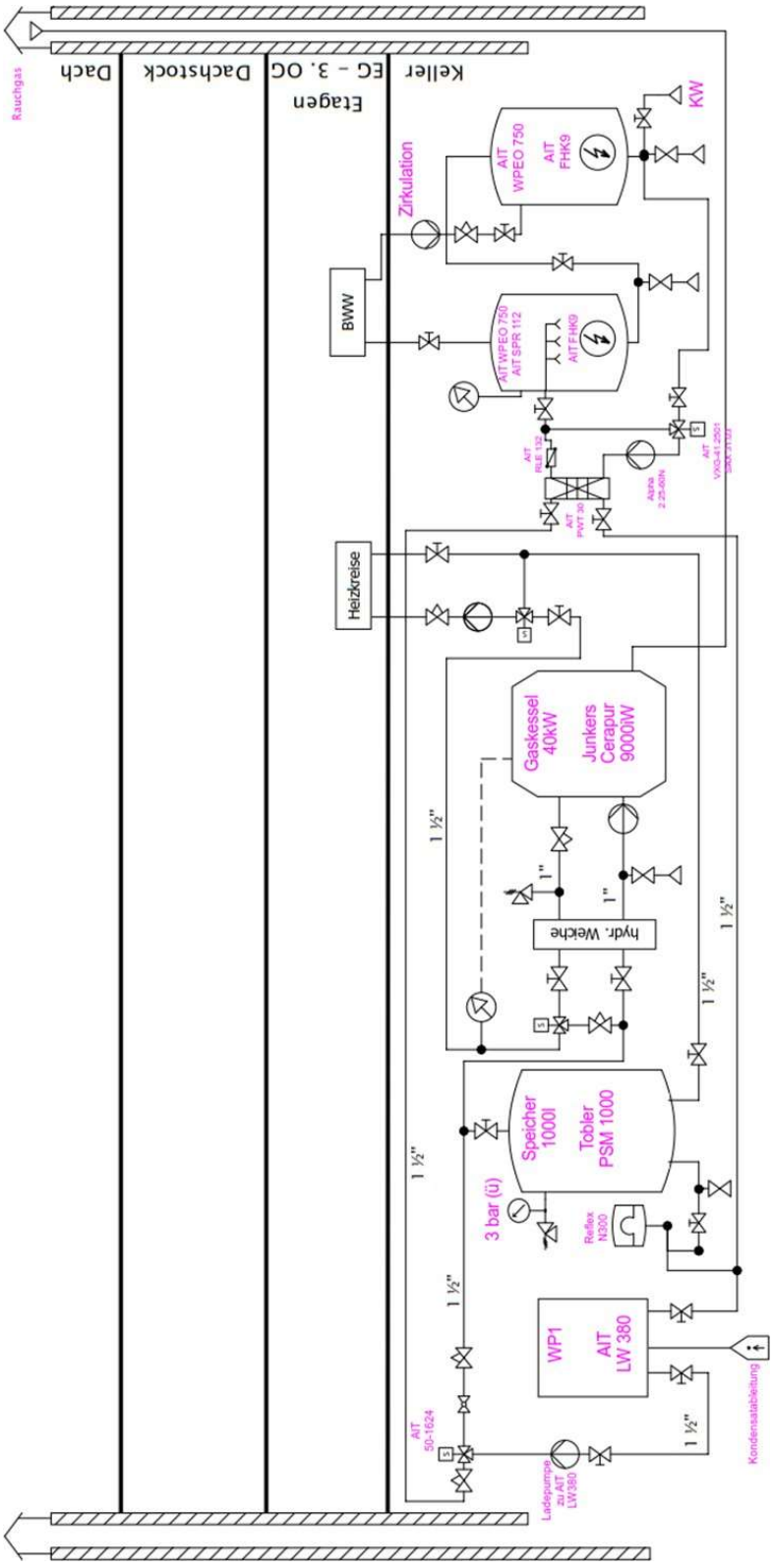
	Absicherung				Leistung	
Hauptanschluss	100 A	=>	692	V	69.20 kW	
Verbraucher						
4.OG rechts	16 A	2LN	400	V	6.40 kW	
4.OG links	16 A	2LN	400	V	6.40 kW	
3.OG rechts	16 A	1LN	230	V	3.68 kW	
3.OG links	16 A	1LN	230	V	3.68 kW	
EG rechts (Büro)	16 A	3LN	692	V	11.07 kW	
Wärme allg.	16 A	2LN	400	V	6.40 kW	
2.OG rechts	16 A	1LN	230	V	3.68 kW	
2.OG links	16 A	1LN	230	V	3.68 kW	
Licht Allgemein	16 A	1LN	230	V	3.68 kW	
1.OG rechts	16 A	1LN	230	V	3.68 kW	
1.OG links	16 A	2LN	400	V	6.40 kW	
Rundsteuerempfänger	10 A	1LN	230	V	0.10 kW	
EG links (Coiffeur)	25 A	2LN	400	V	10.00 kW	
EG mitte	16 A	1LN	230	V	3.68 kW	
Waschautomat 1	10 A	3LN	692	V	6.92 kW	
Tumbler 2	10 A	3LN	692	V	6.92 kW	
Total "berechnete" Leistung						86.37 kW
angenommener Gleichzeitigkeitsfaktor						0.40
Total angenommene Gesamtleistung						
(Totalleistung x Gleichzeitigkeit)						34.55 kW
Total mögliche Reserve für Wärmepumpen						**34.65** kW
Variante 1:						
1x AIT LW 380	40 A	3LN			22.00 kW	12.65 kW
Variante 5.1:						
1x AIT LW 251 A	25 A	3LN			14.40 kW	
1x AIT LW 180 A	20 A	3LN			10.30 kW	
Total: Variante 5.1					24.70 kW	9.95 kW
Variante 5.2:						
1x AIT LW 310 A (pro Gerät)	32 A	3LN			16.80 kW	
3x AIT LW 310 A					50.40 kW	-15.75 kW

Bemerkungen:
- alle Angaben sind als geschätzte Verbraucherwerte anzuschauen
- ebenso ist der angenommene Gleichzeitigkeitsfaktor eine entsprechende Annahme
- eine genaue Berechung kann nur anhang, von am Objekt aufgenommenen Messdaten erfolgen

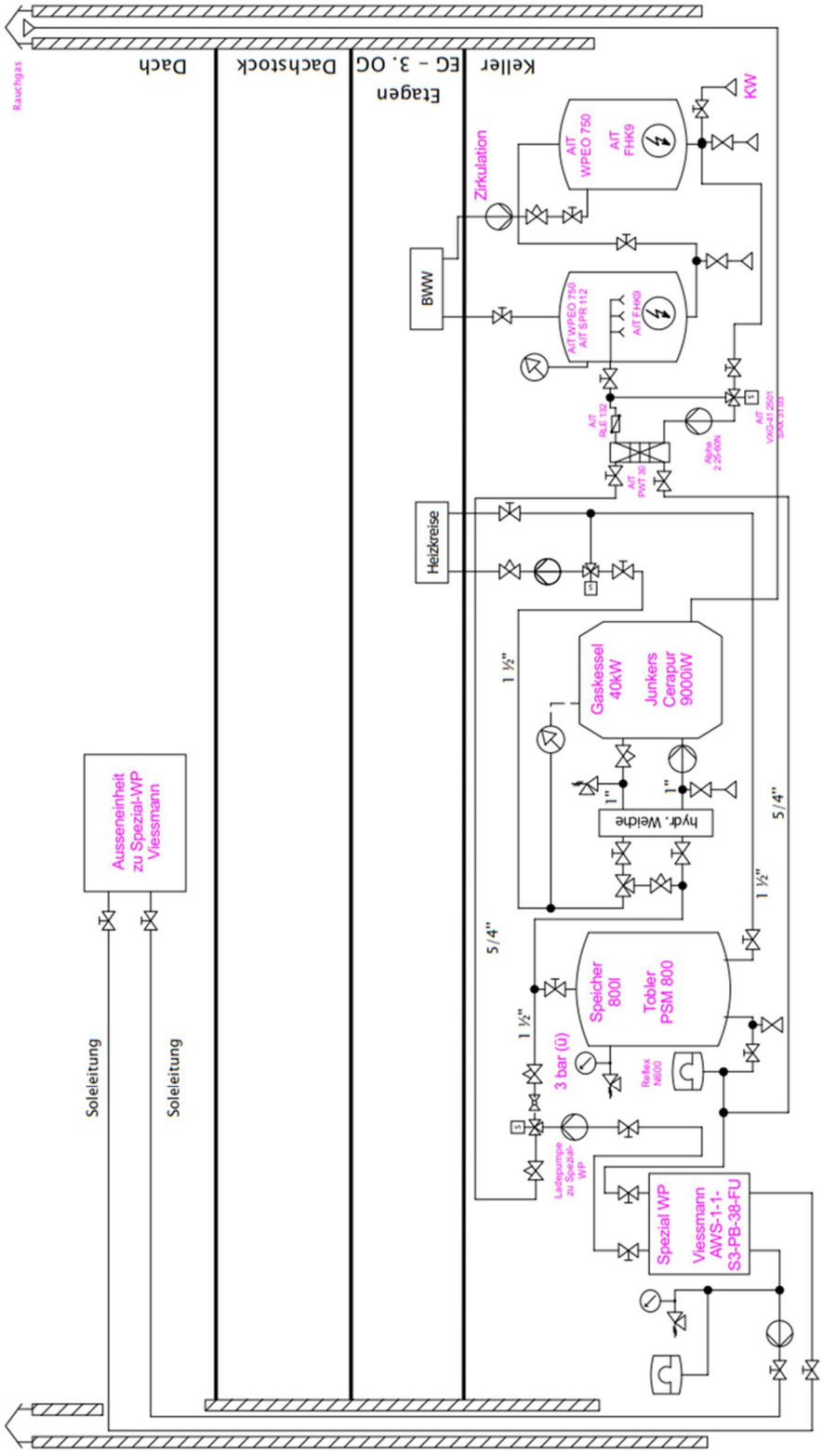
ELGI-Plan GmbH
Max Gsponer

Hochdorf, 12.12.2018

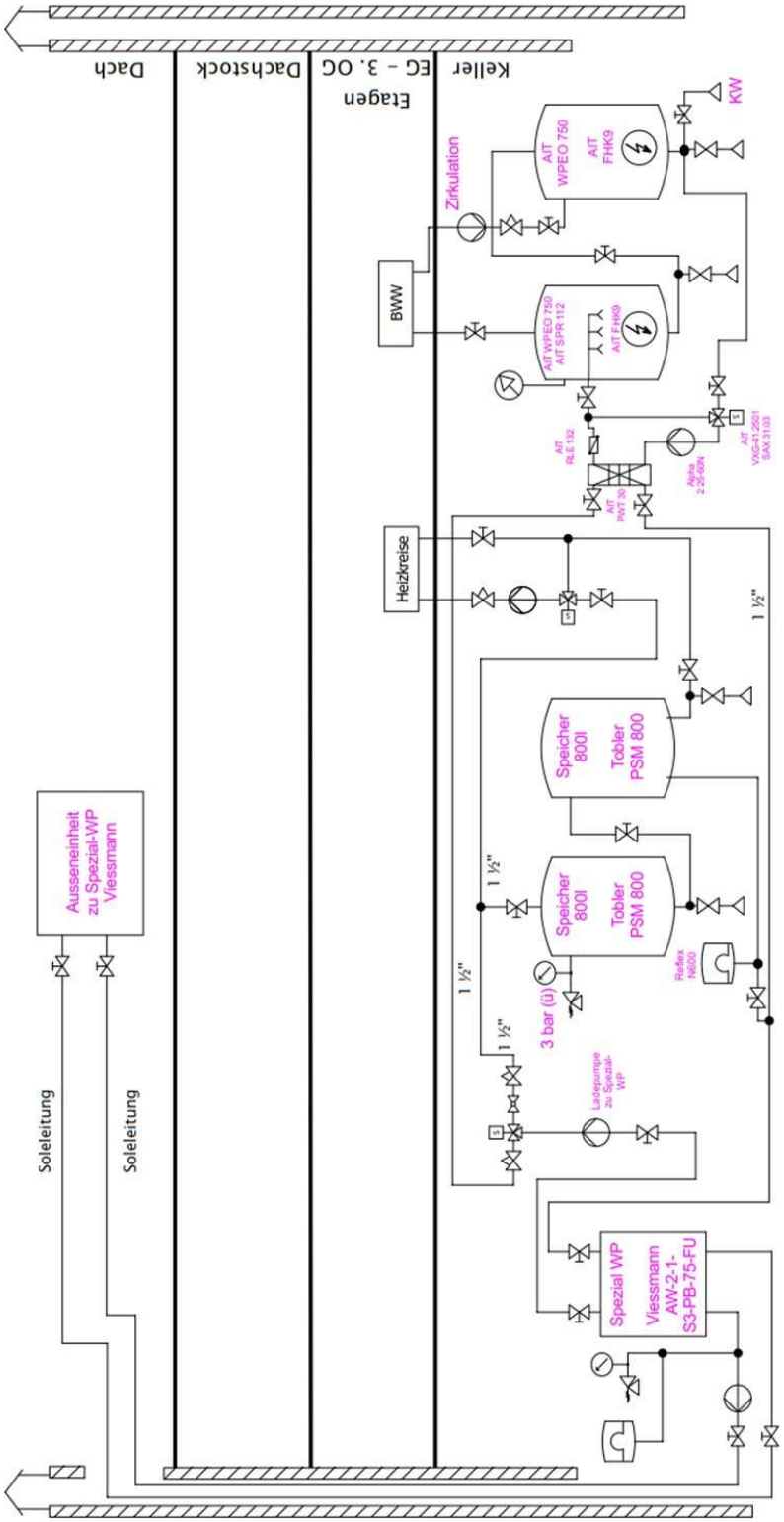
Annexe 11 : Schéma hydraulique, rue Müllerstrasse 34, solution 2 bivalente



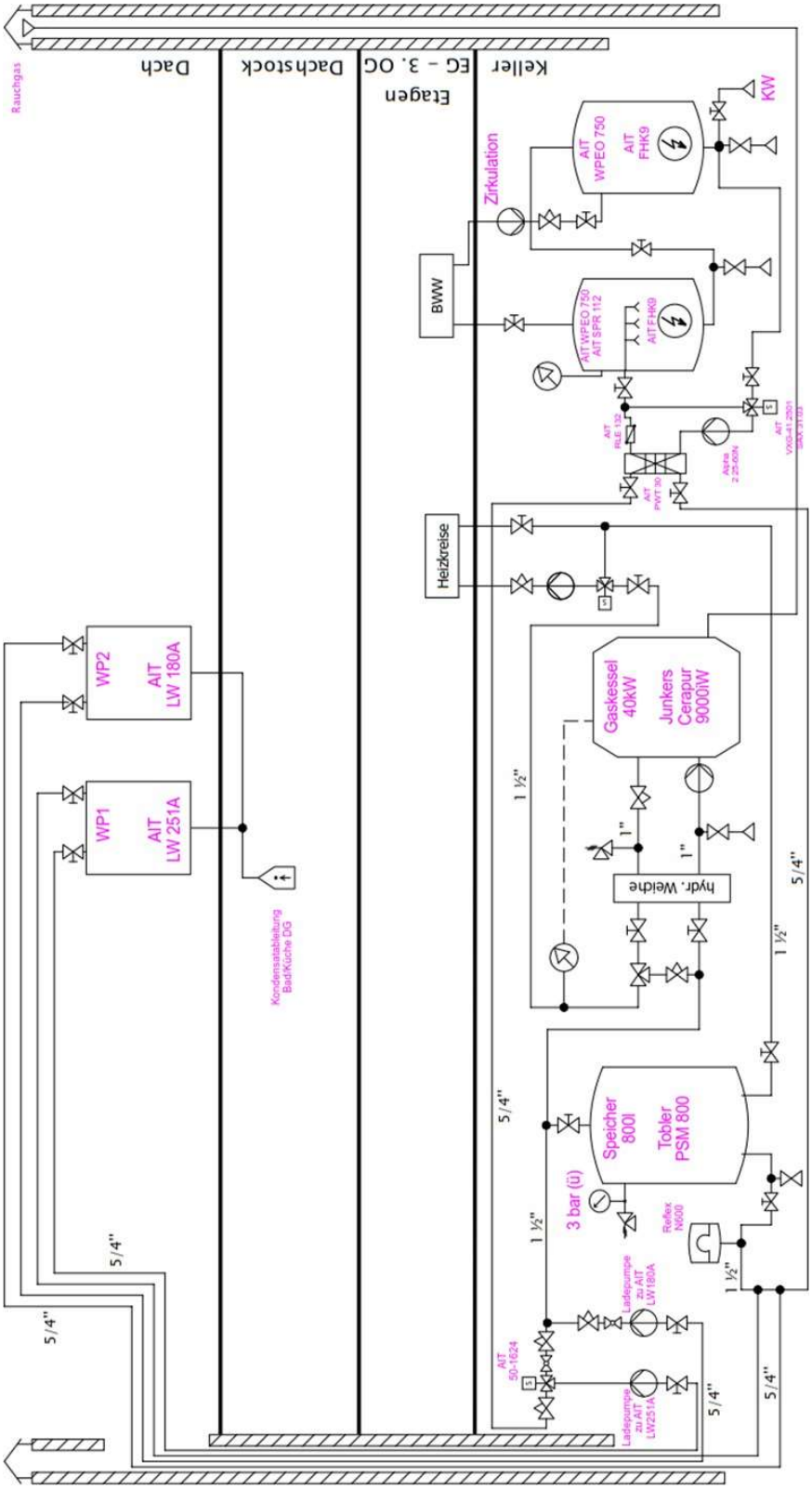
Annexe 12 : Schéma hydraulique, rue Müllerstrasse 34, solution 4 bivalente



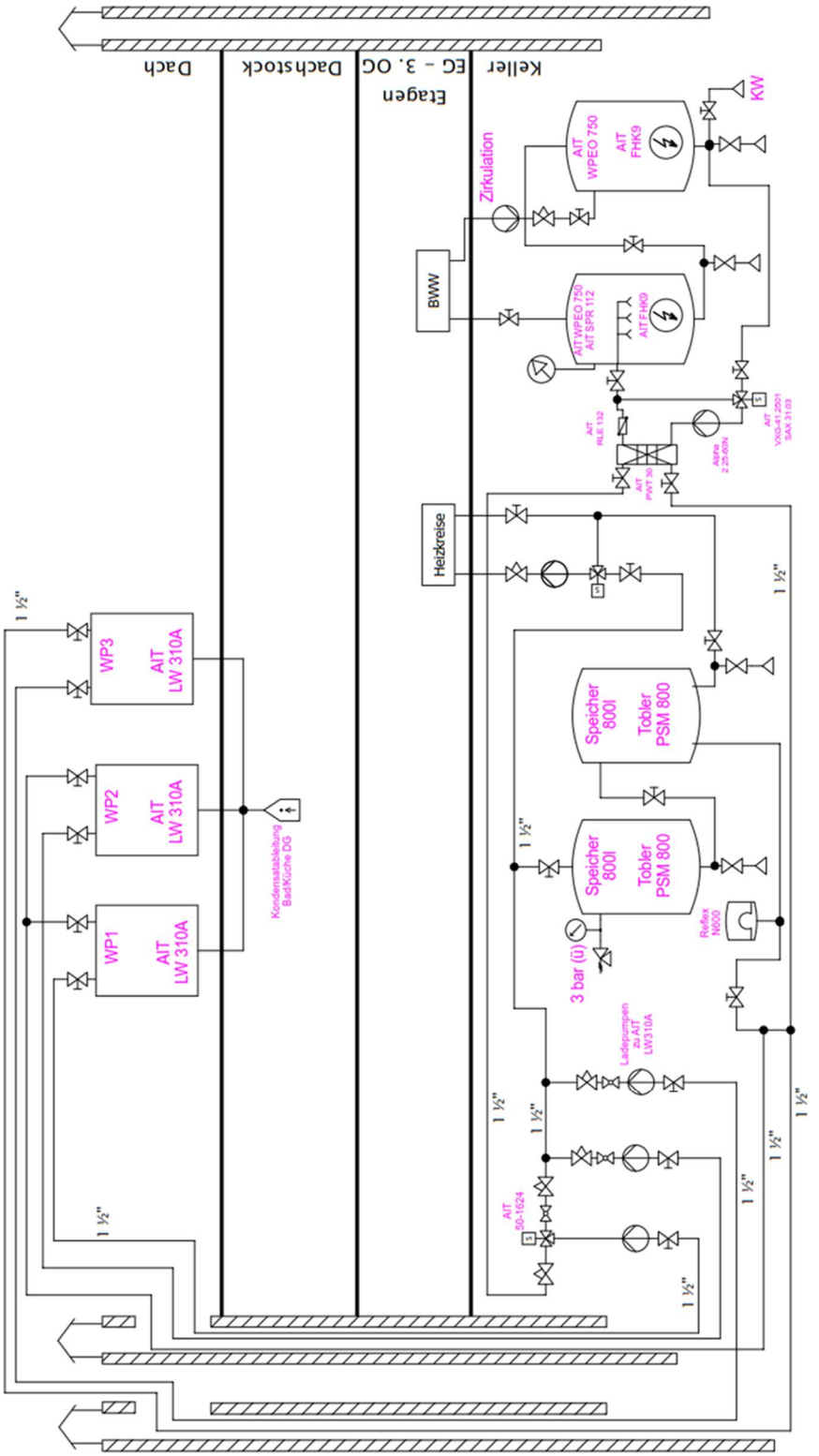
Annexe 13 : Schéma hydraulique Müllerstrasse 34, solution 4 monovalente



Annexe 14 : Schéma hydraulique, rue Müllerstrasse 34, solution 5 bivalente



Annexe 15 : Schéma hydraulique Müllerstrasse 34, solution 5 monovalente



Annexe 16 : Calcul des coûts à la Müllerstrasse 34, variante gaz

Position	Coûts HT – phase étude de faisabilité +/- 25 % [CHF]	Durée d'utilisation [a]	Coûts de maintenance [%]
1. Travaux préparatoires			
1.2 Site d'installation des travaux de jardinage WP : Creusement de conduites souterraines, fosse septique, base d'installation de fondation en béton	3 300	30	1,5
2. Technique/source de chaleur			
2.1 Câbles de raccordement : conduites d'eau de chauffage souterraines pose isolée	1 400	30	5,0
2.2 Hottes d'insonorisation pour pompes à chaleur	300	30	1,5
3. Approvisionnement énergétique			
3.1 Réservoir d'huile : nouveau réservoir en plastique	10 800	20	2,5
3.2 Production du fioul	10 100	20	0,5
4. Génération de chaleur	3 900	30	0,0
4.1 Chaudière : chaudière mazout Tobler SK20			
4.2 Pompes à chaleur : L/W-WP AIT LW180A & AIT LW251A	1 500	20	2,5
4.3 Intégration hydraulique de la production de chaleur : pompes, vannes de commutation, séparateur hydraulique, divers accessoires de tuyauteries, travaux, postes 2 à 5			
4.4 Accumulation de chaleur : chauffage à accumulation tampon, y compris les raccords	3 800	30	1,0
4.5 Isolation : isolation des canalisations et des armatures des portes	2 300	20	1,0
5. Système de cheminée			
5.1 Système de cheminée : système de cheminée matériel	9 100	20	2,5
6. Distribution de chaleur	2 100	40	1,5
9.3 Isolation : Isolation des tuyaux et des raccords, y compris les matériaux et les travaux	700	30	0,0
15. MSRL			
15.1 Appareils de terrain : capteurs de chaudière à gaz	100	15	1,5
15.2 Mise en service : mise en service de la chaudière à gaz par un technicien de service	1 800	15	0,0
16. Electro			
16.1 Démontage : travaux et élimination	1 000	15	0,0
16.2 Câblage : matériel électrique et travaux	1 300	20	1,0
17. Travaux auxiliaires			

17.1 Travaux de démolition : élimination du système de chauffage existant, y compris les travaux et les frais	1 100	20	0,0
18. Frais			

18.1 Honoraires : ingénieur HLKKSE, ingénieur civil, permis	5 100	20	0,0
Total	***59 700***		

Annexe 17 : Calcul de la puissance électrique Kruggasse 8, version courante

ELGI-PLAN GmbH
Hauptstrasse 25
6281 Hochdorf
041 911 04 11
041 911 04 14 (FAX)
info@elgi-plan.ch
www.elgi-plan.ch

ELGI PLAN
INGENIEURBÜRO
ELEKTROTECHNIK

Leistungsberechnungen Kruggasse 8

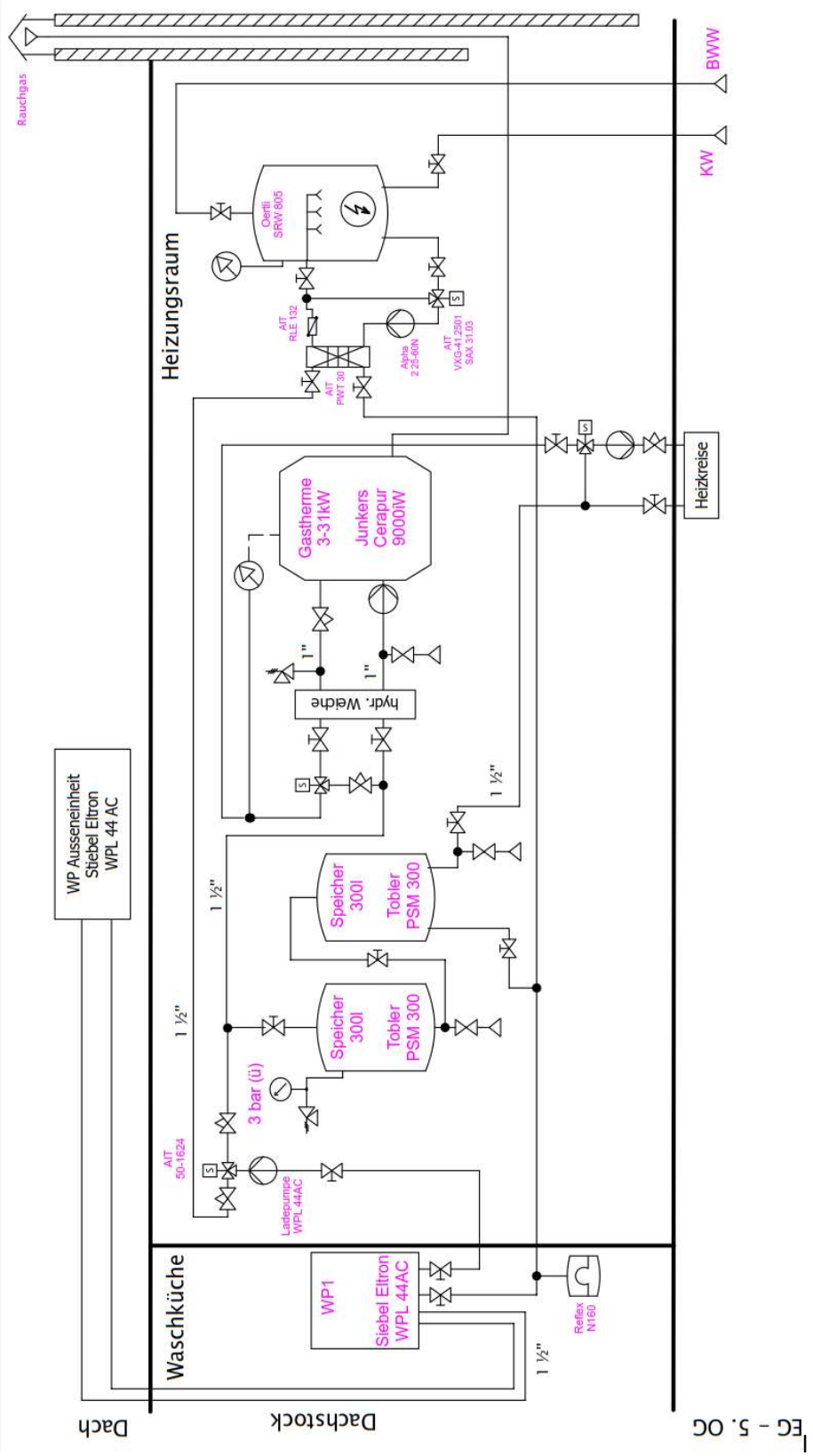
	Absicherung		Spannung		Leistung	
Hauptanschluss	80 A	3LN	692	V	55.36	kW
Verbraucher						
1.OG	16 A	3LN	692	V	11.07	kW
Rundsteuerempfänger	16 A	1LN	230	V	0.10	kW
2.OG	16 A	3LN	692	V	11.07	kW
3.OG	16 A	3LN	692	V	11.07	kW
4. OG	16 A	3LN	692	V	11.07	kW
5. OG	16 A	3LN	400	V	6.40	kW
NKN	16 A	3LN	692	V	11.07	kW
Allgemein	16 A	3LN	692	V	11.07	kW
Heizung	10 A	3LN	692	V	6.92	kW
Total "berechnete" Leistung						79.85 kW
angenommener Gleichzeitigkeitsfaktor						0.40
Total angenommene Gesamtleistung						
(Totalleistung x Gleichzeitigkeit)						31.94 kW
Total mögliche Reserve für Wärmepumpen						**23.42** kW
Variante 4:						
1x Stiebel Electron WPL 44 AC	25 A	3LN			16.60	kW 6.82 kW

Bemerkungen:
- alle Angaben sind als geschätzte Verbraucherwerte anzuschauen
- ebenso ist der angenommene Gleichzeitigkeitsfaktor eine entsprechende Annahme
- eine genaue Berechung kann nur anhang, von am Objekt aufgenommenen Messdaten erfolgen

ELGI-Plan GmbH
Max Gsponer

Hochdorf, 12.12.2018

Annexe 18 : Schéma hydraulique, rue Kruggasse 8, solution 4



Annexe 19 : Calcul des coûts Kruggasse 8, variante gaz et biogaz

Position	Coûts HT – phase d'étude de faisabilité +/- 25 % [CHF]	Durée d'utilisation [a]	Coûts de maintenance [%]
1. Travaux préparatoires			
1.1 Cheminée : gros œuvre	2 100	30	1,5
3. Approvisionnement énergétique			
3.1 Approvisionnement en gaz : conduites de gaz et neutralisation	1 400	20	5,0
3.2 Protection contre les gaz : raccords	300	20	1,5
4. Génération de chaleur			
4.1 Chaudière	10 900	20	2,5
4.2 Intégration hydraulique de la génération de chaleur	10 100	20	0,5
4.3 Isolation : isolation des tuyaux et des raccords	3 900	30	0,5
5. Système de cheminée			
5.1 Système de cheminée : système de cheminée matériel	900	20	2,5
6. Distribution de chaleur			
6.1 Distributeur de chauffage : pompes, mitigeurs, divers raccords, travaux	3 800	30	1,0
6.2 Expansion : Groupe d'expansion et de sécurité comprenant divers raccords, travaux	2 300	20	1,0
9. Plomberie			
9.1 Ballon de stockage d'eau chaude : ballon de stockage d'ECS avec vannes, divers équipements et ouvrages	8 400	20	2,5
9.2 Distribution : distribution BWW, matériel et travail compris	2 100	40	1,5
9.3 Isolation : isolation des tuyaux et des raccords	700	30	0,0
15. MSRL			
15.1 Appareils de terrain : capteurs de chaudière à gaz	100	15	1,5
15.2 Mise en service : mise en service par des techniciens de service	1 800	15	0,0
16. Électro			
16.1 Démontage : travaux et élimination	1 000	15	0,0
16.2 Câblage : matériel électrique et travaux	1 200	20	1,0
17. Constructeur			
17.1 Travaux de démolition : élimination de l'ancien système de chauffage	1 100	20	0,0
y compris les travaux et les honoraires			
18. Frais	4 800	20	0,0

Total Investissement	***56 900***		

Annexe 20 : Données de base pour la comparaison des variantes

Stadt Zürich
Amt für Hochbauten

Stadt Zürich
Amt für Hochbauten
Postfach
8021 Zürich

Tel. +41 44 412 11 11
Fax +41 44 212 19 36
www.stadt-zuerich.ch/hochbau

Variantenvergleich Energiesysteme - Version 2.2

© Stadt Zürich, Amt für Hochbauten - Alle Rechte vorbehalten

Grunddaten Wirtschaftlichkeit und Ökologie

Kalkulationszinssatz (real) 2.5%

Instandhaltungskostensteigerung (real) 0.0%

Energieträger				Wirtschaftlichkeit (alle Preise inkl. MWSt. und CO_2-Abgabe)							Ökologie				
				Leistungspreis (pro Jahr) [Fr./kW]	Preisanteil Energie [Rp./kWh]	Preisanteil Netznutzung [Rp./kWh]	Preisanteil Abgaben [Rp./kWh]	Energiepreis-zuschlag (KEPZ) [Rp./kWh]	Arbeitspreis inkl. Zuschlag [Rp./kWh]	Preissteigerung (linear) [%/a]	Primärenergie nicht erneuerbar [kWh/kWh]	Primärenergie erneuerbar [kWh/kWh]	Treibhausgas-Emissionen [kg/kWh CO_{2e}]	Umweltbelastungspunkte [UBP/kWh]	MINERGIE Gewichtung [-]
Elektrizität	Stadt Zürich Verwaltungsmix	Hochtarif		117	13.4	8.2	1.4	1.1	24.1	1.4	0.046	1.122	0.0127	65.7	
		Niedertarif			9.2	4.1	0.6		15.0						
		WP, Hochtarif			13.4	8.2	1.4		24.1						
		WP, Niedertarif			9.2	4.1	0.6		15.0						
	ewz.basis	Hochtarif		117	8.9	8.2	2.9	1.0	21.1	1.4	0.040	1.100	0.0121	63.1	
		Niedertarif			4.7	4.1	2.1		11.9						
		WP, Hochtarif			8.9	8.2	2.9		21.1						
		WP, Niedertarif			4.7	4.1	2.1		11.9						
	ewz.ökopower	Hochtarif		117	12.5	8.2	1.7	1.1	23.4	1.4	0.040	1.120	0.0113	63.5	
		Niedertarif			8.3	4.1	0.8		14.2						
		WP, Hochtarif			12.5	8.2	1.7		23.4						
		WP, Niedertarif			8.3	4.1	0.8		14.2						
	ewz.wassertop	Hochtarif		117	11.1	8.2	1.7	1.0	21.9	1.4	0.030	1.110	0.0086	58.6	
		Niedertarif			6.8	4.1	0.8		12.7						
	ewz.solartop	Hochtarif		117	58.3	8.2	-10.8	3.0	58.7	1.4	0.350	1.250	0.0803	174.6	
		Niedertarif			58.3	4.1	-10.8		54.6						
	CH-Verbrauchermix	Hochtarif			23.4			7.3	30.7	1.4	2.690	0.450	0.1386	381.6	2.0
		Niedertarif			23.4				30.7						
	Netzrückspeisung erneuerbar	Hochtarif			8.5				8.5	1.4					
		Niedertarif			4.5				4.5						
	Netzrückspeisung nicht erneuerbar	Hochtarif			8.5				8.5	1.4					
		Niedertarif			4.5				4.5						
	Lokales Produkt A	Hochtarif							0.0	1.4					
		Niedertarif							0.0						
		WP, Hochtarif							0.0						
		WP, Niedertarif							0.0						
	Lokales Produkt B	Hochtarif							0.0	1.4					
		Niedertarif							0.0						
		WP, Hochtarif							0.0						
		WP, Niedertarif							0.0						
	Lokales Produkt C	Hochtarif							0.0	1.4					
		Niedertarif							0.0						
		WP, Hochtarif							0.0						
		WP, Niedertarif							0.0						
Brennstoffe	Holzpellets	(mit Partikelfilter)			6.9			2.3	9.2	1.6	0.200	1.020	0.0345	77.4	0.7
	Holzschnitzel	(mit Partikelfilter)			4.6			1.9	6.5	2.9	0.066	1.084	0.0107	64.1	
	Biogas - Durchschnitt CH				16.7			4.2	20.9	1.2	0.308	0.030	0.1318	110.9	1.0
	Biogas - Energie360° (naturemade star)			36.7	14.3			2.1	16.4	1.2	0.221	0.038	0.0770	56.9	
	Erdgas			36.7	6.1			2.2	8.3	2.2	1.060	0.010	0.2279	136.8	
	Heizöl EL				7.6			4.3	11.9	1.6	1.220	0.010	0.2977	221.0	
	Brennstoff XY								0.0						
Fernwärme	Stadt Zürich		degressiv	11.3	8.0			1.8	9.8	1.3	0.370	0.180	0.0684	58.7	0.6
	Durchschnitt CH (KVA)		linear	0.0	7.4			1.8	9.2	1.3	0.451	0.261	0.0889	73.8	
	Fernwärme XY		linear						0.0	1.3					
Verbundwärme /-kälte	Wärmeverbund XY								0.0						
	Kälteverbund XY								0.0						

Das Amt für Hochbauten ist eine Dienstabteilung des Hochbaudepartements der Stadt Zürich

Qualität ISO 9001
Umwelt ISO 14001

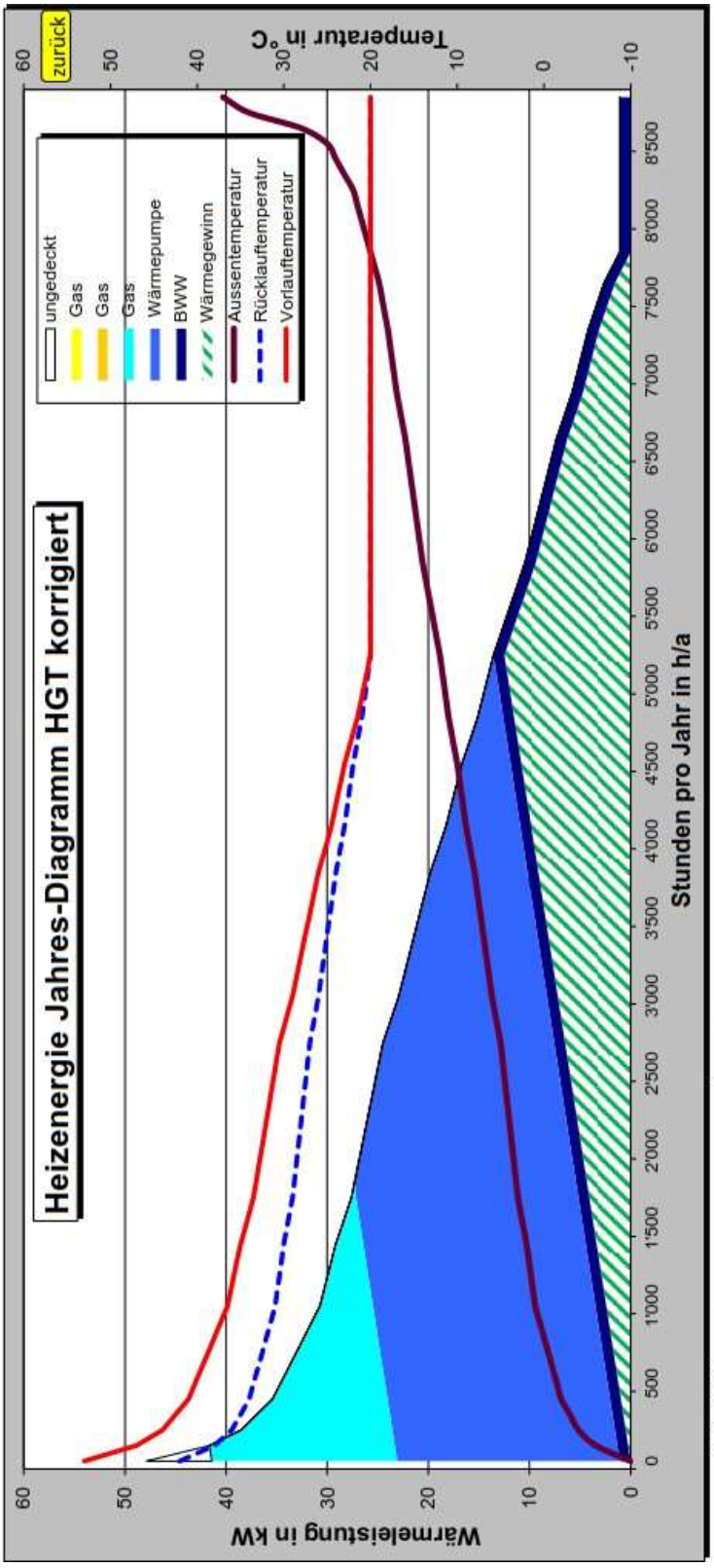
Annexe 21 : Financement d'un exemple de planification de projet

Synthèse des subventions/aides :

Apports de 2000 watts de la compagnie d'électricité de la ville de Zurich (EWZ)

Adresse	EBF	Betrieb	Anwendung	Förderbeitrag	WP-Anteil	Investitionskosten Erzeugung gem. WP-Tool
Hofwiesensrasse 126	447 m²	bivalent	Heizung	CHF 3'387	86%	CHF 33'128
			Heizung und BWW	CHF 5'812	88%	CHF 41'949
Müllerstrasse 34	869 m²	nonovalent	Heizung	CHF 6'679	100%	CHF 49'628
			Heizung und BWW	CHF 11'923	100%	CHF 68'782
		bivalent	Heizung	CHF 5'764	86%	CHF 39'675
			Heizung und BWW	CHF 10'304	87%	CHF 54'608
Kruggasse 6+8	782 m²	bivalent	Heizung	CHF 5'305	86%	CHF 34'995
			Heizung und BWW	CHF 9'413	89%	CHF 47'427

Base de calcul : subventions pour Hofwiesenstrasse 126



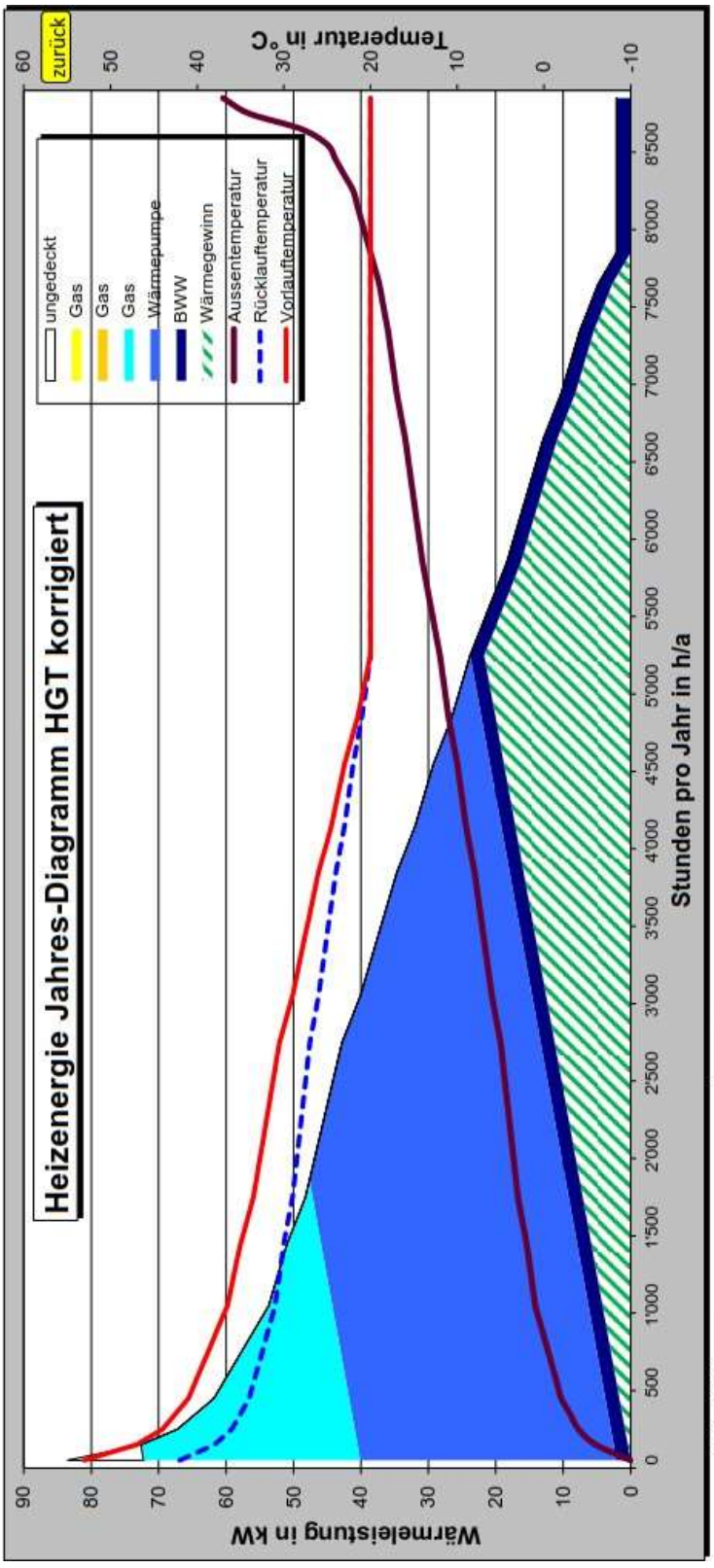
Bedarf / Nutzung

Klimaregion	Zürich-SMA
Wärmebedarf Raumheizung	43.7 kW
EBF	447 m²
Auslege-Aussentemperatur	-8 °C
Auslege-Raumtemperatur	20 °C
Erhöhung Raumtemperatur	0 K
Heizgrenze	12 °C
Wärmegewinn bei -8°C	0%
Wärmegewinn	49 MWh/a

Erzeugung

	Wärmebedarf inkl. BWW	BWW	Raumheizung			
			Wärmepumpe	Gas	Gas	Gas
Nennwärmeleistung	44.8 kW	1.1 kW	22.0 kW	30.0 kW	-	-
Wärme	98.7 MWh/a	9.4 MWh/a	77.0 MWh/a	12.3 MWh/a	-	-
Anteil Energie	100%	10 %	78 %	12 %	-	-
Volllaststunden	2'204 h/a	3'745 h/a		410 h/a	-	-
Betriebsstunden	8'760 h/a	8'760 h/a	5'100 h/a	1'700 h/a	-	-
ϑ_A bei Zuschaltung			11.8 °C	3.0 °C	-	-
ϑ_{VL} bei Zuschaltung			20.4 °C	33.5 °C	-	-

Base de calcul : subventions pour Müllerstrasse 34



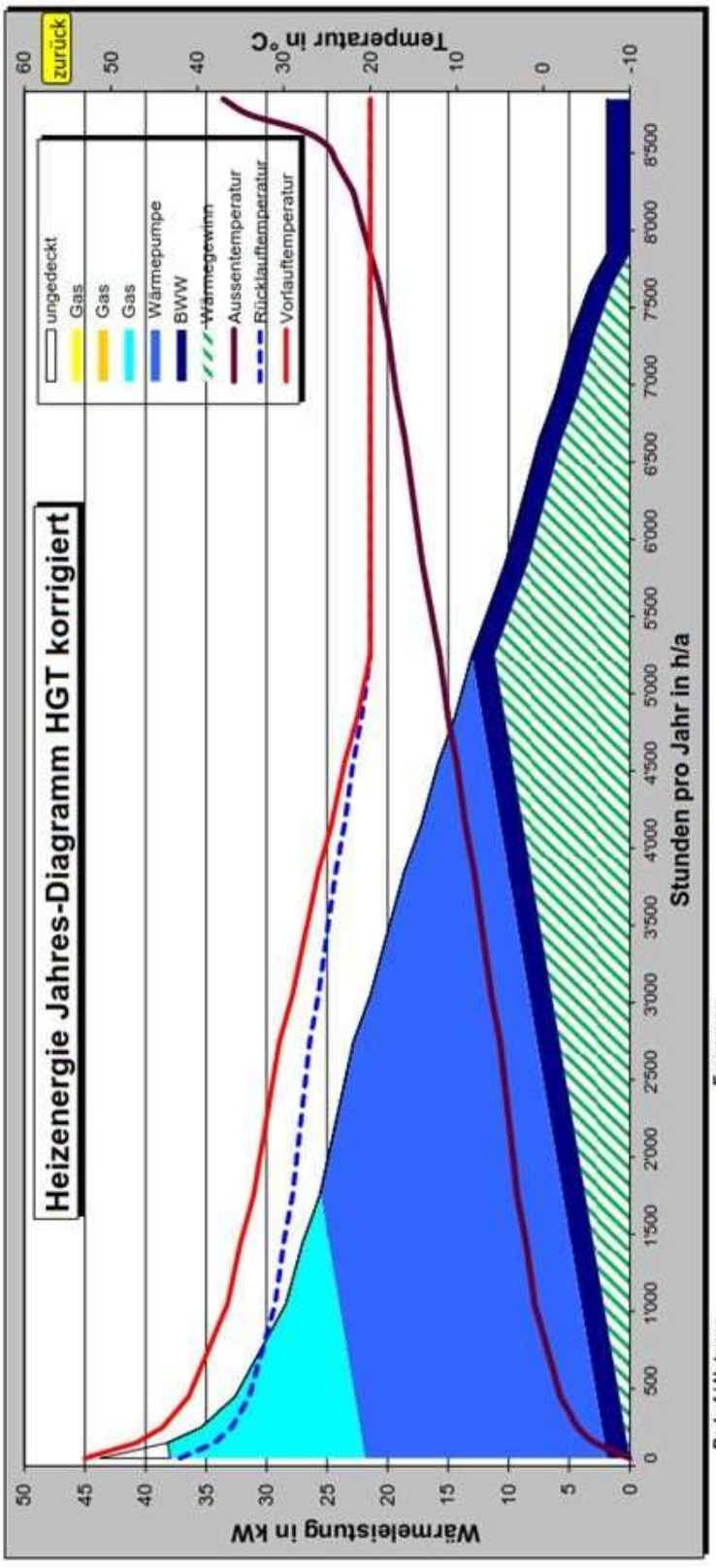
Bedarf / Nutzung

Klimaregion	Zürich-SMA
Wärmebedarf Raumheizung	76.0 kW
EBF	869 m²
Auslege-Aussentemperatur	-8 °C
Auslege-Raumtemperatur	20 °C
Erhöhung Raumtemperatur	0 K
Heizgrenze	12 °C
Wärmegewinn bei -8°C	0%
Wärmegewinn	86 MWh/a

Erzeugung

	Wärmebedarf inkl. BWW	BWW	Raumheizung			
			Wärmepumpe	Gas	Gas	Gas
Nennwärmeleistung	78.1 kW	2.1 kW	38.0 kW	54.0 kW	-	-
Wärme	173.6 MWh/a	18.3 MWh/a	133.4 MWh/a	21.8 MWh/a	-	-
Anteil Energie	100%	11 %	77 %	13 %	-	-
Volllaststunden	2'223 h/a	3'785 h/a		405 h/a	-	-
Betriebsstunden	8'760 h/a	8'760 h/a	5'100 h/a	1'800 h/a	-	-
ϑ_A bei Zuschaltung			11.8 °C	3.2 °C	-	-
ϑ_{VL} bei Zuschaltung			20.4 °C	33.2 °C	-	-

Base de calcul : subventions pour Kruggasse 8



Bedarf / Nutzung

Klimaregion	Zürich-SMA
Wärmebedarf Raumheizung	39.1 kW
EBF	762 m²
Auslege-Aussentemperatur	-8 °C
Auslege-Raumtemperatur	20 °C
Erhöhung Raumtemperatur	0 K
Heizgrenze	12 °C
Wärmegewinn bei -8°C	0%
Wärmegewinn	44 MWh/a

Erzeugung

	Wärmebedarf inkl. BWW	BWW	Raumheizung			
			Wärmepumpe	Gas	Gas	Gas
Nennwärmeleistung	41.0 kW	1.9 kW	20.0 kW	36.0 kW	-	-
Wärme	96.4 MWh/a	16.5 MWh/a	69.4 MWh/a	10.5 MWh/a	-	-
Anteil Energie	100%	17 %	72 %	11 %	-	-
Volllaststunden	2'352 h/a	3'927 h/a		291 h/a	-	-
Betriebsstunden	8760 h/a	8760 h/a	5'100 h/a	1700 h/a	-	-
ϑ_A bei Zuschaltung			11.8 °C	3.0 °C	-	-
ϑ_{VL} bei Zuschaltung			20.4 °C	33.5 °C	-	-