



中德能源与能效合作
Energiepartnerschaft
DEUTSCHLAND - CHINA

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

德国可持续供热方案研究—— 最佳实践及中国的适用性分析

中德能源与能效合作伙伴



出版说明

《德国可持续供热方案研究——最佳实践及中国的适用性分析》在中德能源与能效合作伙伴项目框架下发布。中德能源与能效合作伙伴项目立足于政府层面，致力于促进中德两国政府在推动能源转型领域的政策对话，同时也促进两国企业的交流。中德能源与能效合作伙伴在两国主管部门领导下开展活动，中方负责整体协调的部门是国家发改委和国家能源局，德方是德国联邦经济与能源部。受德国联邦经济和能源部委托，德国国际合作机构（GIZ）负责该项目德方的具体实施。

出版方：

中德能源与能效合作伙伴
北京市朝阳区亮马河南路14号
塔园外交办公楼2-5
邮编：100600
c/o
德国国际合作机构
Torsten Fritsche
Köthener Str. 2
柏林10963, 德国

研究负责人：

尹玉霞、马琼英、Maximilian Ryssel、阳能
德国国际合作机构

研究协调方：

Wolfgang Eichhammer
弗劳恩霍夫系统与创新研究所（Fraunhofer ISI）

作者：

Wolfgang Eichhammer, Markus Fritz
弗劳恩霍夫系统与创新研究所（Fraunhofer ISI）
Martin Pehnt, Sara Fritz, Michael Nast
海德堡能源与环境研究所（ifeu）
Jan Steinbach, Jasmin Henrich, Eftim Popovski
资源效率和能源战略研究所有限公司（IREES GmbH）

致谢：

特别感谢电力规划设计总院李文凯、赵文瑛对本研究的支持！

引用格式：

Fraunhofer ISI.; IFEU; IREES (2019): 《德国可持续供热方案研究——最佳实践及中国的适用性分析》卡尔斯鲁厄、海德堡

图片来源：

德国联邦经济和能源部（封面）

排版：

Flow.asia

© 北京，2019年11月

本报告全文受版权保护。截至本研究报告发布前，德国国际合作机构和相关作者对出版物中所涉及的数据和信息进行了仔细研究与核对，但不对其中所涉及内容及评论的正确性和完整性做任何形式的保证。本出版物中涉及到的外部网站发行方将对其网站相关内容负责，德国国际合作机构不对其内容承担任何责任。

目录

前言	4
1 执行摘要	5
2 研究概述	8
2.1 研究目的	8
2.2 德国供热/制冷需求和政策框架	9
3 可持续供热技术选择方法	12
4 可持续供热方案的选择	14
4.1 低排放的小型固体生物质炉具	14
4.2 加装光伏和热水器的空气源热泵系统	18
4.3 地源热泵（GSHP）	26
4.4 带有热泵的光伏/光热集热器	31
4.5 污水热回收系统	35
4.6 生物质能村庄/社区	40
4.7 大型太阳能集热站	46
4.8 地热区域供热	51
4.9 带有燃气热电联产、热泵和季节性储热的集中供热/冷网	59
4.10 工业余热回收	65
5 综合讨论与结论	70
6 图片列表	72
7 表格列表	73
8 参考资料	74



前言

尊敬的读者朋友们，

全球变暖正在成为我们这个时代最主要的挑战。近年来各地频发的干旱，洪水和极端天气不断在对我们长达一个世纪对化石燃料的依赖发出质疑。在能源领域，气候变化是德国“能源转型”和中国“能源革命”的主要推动力。过去20年，我们取得了很多成就，尤其是在电力领域。目前可再生能源在德国电力生产中占到40%以上，而中国则拥有全球最大的可再生能源装机容量（超过700吉瓦）。但是我们的行动依然不够，我们必须开始将视线拓展到电力以外的领域，尤其是电力以外的主要能源消费部门：供热领域。

实际上，建筑和工业供热领域的能源消耗可以占到能源总消耗的50%左右。但是该领域的去碳化难度也相对更大。成功的供热转型要求我们在保障数以百万居民冬天供热需求的同时，找到无论从技术层面、经济层面还是最重要的社会层面均可行的解决方案。作为能源转型的重要组成部分，德国联邦政府确定了至2050年所有领域实现碳中和的气候目标。在供热领域德国遵循双轨制，即增加可再生能源的比例的同时，大力促进建筑能效标准的提高。因此德国通过《可再生能源供热法》设定了在新建建筑中强制使用可再生能源供热技术的最低要求；《节能条例》则为新建建筑的最大一次能源消耗设定了限制值。在这两项政策和其他更多不同（财政）激励机制的推动下，目前德国新建建筑中可持续和可再生能源供热技术的普及率达到了50%。而就在最近，德国决定在供热领域引进碳价机制，这无疑将进一步刺激和加速德国的供热转型。

中国也同样将供热转型视为能源革命的核心任务之一。中国至2021年实现70%清洁供热这一雄心勃勃的目标不仅对应对气候变化至关重要，同时也是减少大城市空气污染的关键举措。中国在推动能源革命的进程中积极贯彻习近平总书记提出的“四个革命、一个合作”能源安全新战略，后者强调了

积极推进国际合作，加强双边交流与学习。中德能源与能效合作伙伴在德国联邦经济与能源部（BMWi）、中国国家发展和改革委员会（NDRC）、中国国家能源局（NEA）的共同发起和指导下，作为两国能源领域的交流与合作平台，将中德两国政府、企业和学术几个层面的交流联系在一起，共同探寻能源领域所面临挑战的解决方案。

可持续供热一直以来都是中德能源与能效合作伙伴的重点关注议题之一。到目前为止，我们主要专注于供热转型政策工具相关的交流。2019年，该领域的对话被提升到了一个新的高度，即针对供热解决方案相关的最佳实践开展深入交流。本研究报告重点介绍德国可持续供热领域10项技术的最佳实践，并就其对中国的适用性进行探讨。该报告由德国霍劳恩霍夫系统与创新研究所（Fraunhofer ISI），海德堡能源与环境研究所（ifeu）以及资源效率和能源战略研究所（IREES）共同编制，并得到了中国电力规划研究院（EPPEI）的大力支持。在此感谢所有参与本报告的专家和合作伙伴的支持，我们衷心希望该报告将有助于为可持续、宜居未来寻找答案，并进一步推动中德在供热领域的合作。



Markus Delfs

可持续转型—投资与基础设施、能源、交通、废弃物管理
项目组组长
德国国际合作机构（GIZ）

1. 执行摘要

本研究的核心是对德国农村和城市地区的清洁供热解决方案进行梳理和分析。这些解决方案已经在德国被成熟运用或推广，并且可能对中国也有一定的借鉴意义。报告主要关注那些已经有应用案例的创新型可持续综合供热解决方案，并同时考虑了当地情况（资源）以及经济性（商业模式）。德国的经验和德国供热领域的创新实践案例是本研究的出发点和重点。

选择的技术有两个主要特点：

- 这些技术将有助于减少由于大量使用煤炭造成的环境污染；
- 这些技术将有助于减缓气候变化。

本研究聚焦于目前以及未来十年内可以实施的项目。同时，这些技术应该支持2050年的长期气候目标。在这一目标下，中德两国都仍要在温室气体减排方面做出巨大努力。在这一背景下，就符合上述要求的技术和战略进行交流至关重要。

本研究在选择适应中国实际条件的可持续供热技术时的流程如下：首先，选择了20种可持续供热技术，以长名单的形式对这些技术进行了初步的描述，并与中方专家进行了探讨。长名单主要涵盖供热（有时也包括供冷）技术和系统，其满足低污染

物排放和低二氧化碳排放这两个要求。选择的标准主要包括：

- 所选技术需具有一定程度的创新性并有良好的未来前景。其中一些技术甚至从2030往后的角度来看都应具有创新性。
- 一些常用技术，如燃气和燃油冷凝锅炉等，没有被包括在内。
- 清洁煤技术（如以煤为基础的低排放技术，如粉尘排放）不在考虑范围内，因为这些技术仍然对气候有较大影响。所选择技术应该既为当地的减排做贡献（环境效益），也为全球的减排做贡献（气候效益）。
- 清单中没有包括那些在德国缺乏技术供应商或应用经验的技术（如秸秆锅炉）。

长名单的技术按照从简单（单体应用）到复杂（大规模解决方案，如城区解决方案等）分为了三组：分布式供热系统、区域供热系统（DH）、大型集中供热系统（含大型管网）。

在电力规划设计总院专家的支持下，我们从长名单中选择了10种清洁供热技术，并在下表中用粗体进行了标明。本研究将对这10种技术进行具体分析。

可持续供热技术长名单

编号	分布式供热系统与技术	应用地区
1	低排放的小型固体生物质炉具	农村地区
2	加装光伏和热水器的空气源热泵系统	农村和城市地区
3	地源热泵	农村和城市地区
4	微型燃料电池热电联产加调峰燃气锅炉	农村地区
5	（低排放）生物质颗粒锅炉加太阳能热水器	农村地区
6	（低排放）生物质颗粒锅炉加光伏供暖及热水系统	农村地区
7	生物混合热泵，加装固体生物质锅炉（用于调峰）	农村和城市地区
8	带有冰蓄热的热泵及太阳能集热器（及光伏）系统	城市地区
9	带有热泵的光伏/光热集热器	农村和城市地区

编号	区域供热技术	应用地区
10	（粪污）沼气集中供热	农村地区
11	污水热回收系统	城市地区
12	带有热泵的燃气热电联产系统	城市地区
13	分布式热泵集中供冷	农村和城市地区
14	生物质锅炉、太阳能供热及季节性储热系统	农村地区

编号	大型集中供热技术（含管网）	应用地区
15	大型热泵（河水源、地铁余热等）	城市地区
16	大型太阳能集热装置	城市地区
17	地热集中供热	城市地区
18	带有燃气热电联产、热泵和季节性储热的集中供热/冷网	农村和城市地区
19	工业余热回收系统	城市地区
20	带有可再生能源合成甲烷（电制气）的燃气热电联产	城市地区

下图根据以下列举的五个标准，综合地对所选择的十个技术进行了描绘。五个标准为：

- 温室气体减排潜力：**所有选定的技术都有很大的温室气体减排潜力，它们将在中长期（2030年和2050年）的时间段内起到重要作用。当然，对于使用电力的技术（如热泵和流体循环泵），其具体的温室气体减排量还取决于电源结构。中国和德国现有电力系统中的煤炭占比仍然较高，因此这些靠电力驱动的技术的减排潜力仍然有限。但随着德国退出煤炭战略的出台以及未来电力系统中可再生能源占比的进一步增加，这些技术的温室气体减排潜力可以得到充分发挥。
- 减少区域污染的潜力：**所列举的技术也都有很大的环境效益。对于某些生物质供热技术来说，可能只部分减少了排放，具体的环境效益还取决于用户的行为习惯。但对于其它大部分技术来说，基本不会产生污染排放；当然，如果从全生命周期的角度来看，具体的环境效益也和电源结构及发电厂的减排措施有关，这与温室气体减排的情况相同。

- 资源：**在资源方面，我们关注对于非生物（包括地下水、地表水）和生物资源的可持续性使用和土地面积等问题。特别是，生物质是一个相对有限的资源，其它领域（如交通、工业等）也需要生物质。对于其他技术来说（如太阳能集中供热），土地面积可能是一个问题。对于地热来说，地下水资源和地震风险等可能是需要考虑的因素。
- 总成本：**与常规技术相比，本研究中所列举的技术的总成本（平准化供热成本）还是相对较高，有一些比常规技术高30%-50%。需要强调的是，这些技术在中国和德国的成本无法直接进行比较，比如某些常规技术（如冷凝锅炉）在德国的造价也比中国高很多。下一步可以对这些技术在中国的经济性进行更加深入的分析。另外还需要强调的是，随着未来技术的进步，全球平均成本会进一步有所下降。
- 市场推广：**所列技术中有一半已经处于市场推广的某个阶段（如带减排装置的生物质炉具）。而其他的技术，例如更复杂的光伏光热集热器与热泵的结合还处于小范围推广或过渡阶段（太阳能光热站或者深层地热）。需要强调的是，所有列举的技术都有着越来越高的市场需求，随着成本的不断下降，可以进一步开发市场潜力。

对所选择的10个可持续供热技术的综合评估



注：
* 对生物和非生物资源的可持续利用情况，包括水和土地面积
** LCOH：平准化供热成本，与常规技术比较
与电源结构相关

有许多趋势会影响本研究中分析的可持续供热技术以及长名单中所涉及的技术的未来需求。除了脱碳和减少污染物排放外，这些趋势还包括（参见下图）：

- 技术的综合与集成（特别是与热泵和储热相结合）；
- 领域耦合（如供热领域为电力领域提供灵活性，特别是在可再生能源占比越来越高的情况下，电力系统灵活性愈发重要）。向第五代区域供热系统转型为创新型供热技术的发展提供了巨大潜力；

- 低焓（如向更低温度区间的低温供热和热输送技术的转型）；
- 最后，数字化和自动化也为可持续供热技术在减少本地污染排放和碳排放之外开辟了更多途径。从中长期的角度看，当电力行业近乎脱碳的时候，这一潜力将进一步得到加强。



如图中所示，建立在先前成功的可持续供热政策基础上的不同供热工具可以为技术的进一步推广铺平道路。

2. 研究概述

2.1 研究目的

随着中国快速的城市化进程和经济的不断发展，我们对供暖和生活热水的能源需求也在不断增加。现如今，中国供热能源结构中63%来自于热电联产（以燃煤为主），36%来自于燃煤或燃气锅炉。从中期来看，煤炭被认为依然是中国主要的供热能源。此外，尽管风能和太阳能等可再生能源已经在电力市场中具有一定规模，但煤炭依然是我国电力生产的主要能源来源。供热领域煤炭的广泛使用在很大程度上加剧了温室气体的产生，导致全球的气温持续上升。

在中国一些大城市空气污染严重（部分原因是燃煤采暖）的背景下，中国政府越来越多地尝试推广替代供热技术。例如，2021年之前，中国北方用于供热采暖的煤炭消耗量每年必须减少1.5亿吨。为此，中国目前正在大力推广“清洁”供暖（包括太阳能热、地热、生物质能，尤其是天然气），使用电锅炉和热泵（关键词：电制热）以及将工业余热整合到集中供热系统中。

在此背景下，本研究的目的是确定和梳理德国在可持续热力生产和供应的方案和技术（“供热解决方案”）方面的最佳实践，为中国供热/制冷市场向更可持续的解决方向转型提供信息和参考。同时本研究也将特别考虑符合中国实际情况的案例的可复制性和适用性。本研究通过重点介绍创新的德国供热解决方案，为加强行业互相整合、深化供热领域的双边合作奠定基础。

本研究的核心是对德国农村和城市地区的清洁供热解决方案进行梳理和分析。研究重点是已经实施的、创新、可持续、综合供热解决方案，在分析时考虑当地资源禀赋和经济性（商业模式）。德国的经验和德国供热领域的创新实践案例是本研究的出发点和重点。

选择的技术有两个主要特点：

- 这些技术将有助于减少由于大量使用煤炭造成的环境污染；
- 这些技术将有助于减缓气候变化。

本研究聚焦于目前以及未来十年内可以实施的项目。同时，这些技术应该支持2050年的长期气候目标。和德国一样，2050气候目标也要求中国在减少温室气体排放领域做出大量努力。在这一背景下，就符合上述要求的技术和战略进行交流至关重要。

报告分为以下几个部分：本章接下来的小节将概述德国供热和制冷领域的政策框架，包括一些统计数据；第三章将介绍可持续供热技术的选择；第四章，也是本报告的核心章节，将具体展开介绍和讨论一系列可持续供热技术，包括每一项技术在中国的适用性。第五章总结并得出结论。

2.2 德国供热/制冷需求和政策框架

建筑领域的供热需求显示了可持续供热技术和能效措施在德国能源转型中的重要性。用于供热（包括采暖和热水供应）的终端能源消耗占德国终端能源总消耗的31%（图1）。在德国，尽管最近几年由于夏天极端高温天气的频现，导致室内空调制冷系统安装有所增长，但和供热能源需求相比，室内制冷的能耗几乎可以忽略不计。

在德国，三分之二的既有建筑建于1979年以前，并且没有任何能源绩效标准要求（图2）。

可持续供热解决方案适用于具有低温热传输系统的建筑物，该系统要求热能在建筑物中扩散时的热损失尽可能低。也就是说，这些技术的成功推广和应用取决于建筑物本身的节能措施，例如外墙和屋顶的保温隔热，安装高效密闭的窗户等。在德国，超过50%的老旧建筑的屋顶、顶层区域已经完成节能改造。20-32%则做了外墙隔热保温方面的改造，这一比例仍相对较低的原因是随着建筑物建造年代的推近，节能改造的比例也逐步下降，建造年代越新的建筑本身改造率较低，另一方面大部分新建筑已经在建造的过程中安装了隔热层[2]。

图1：德国2017年终端能源总消耗

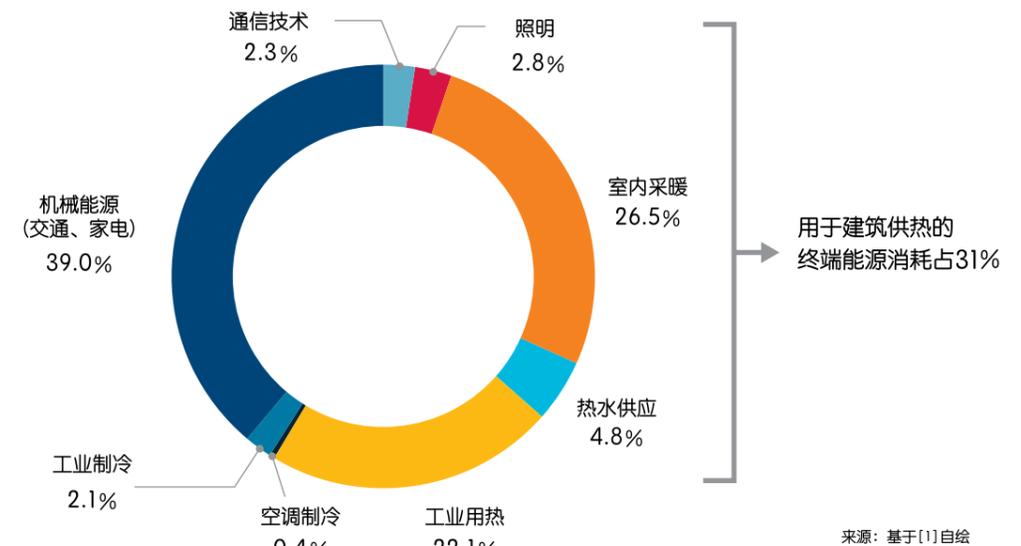
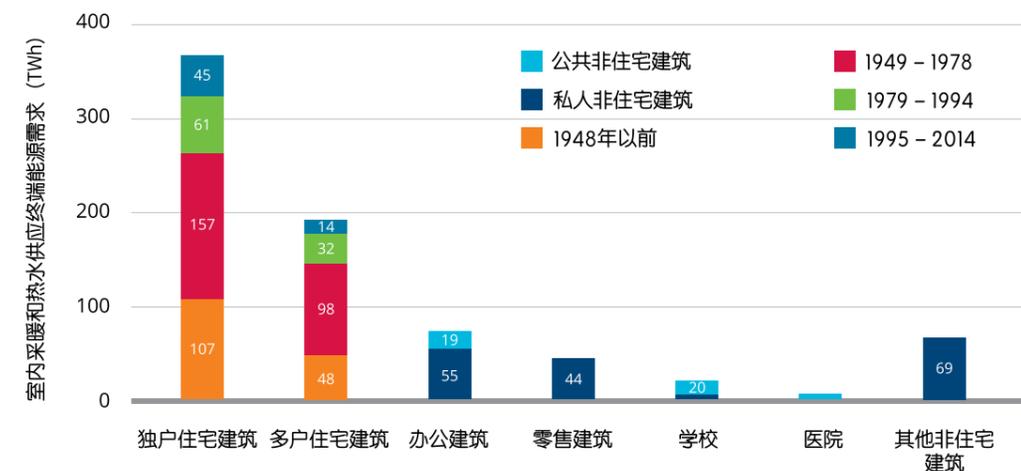
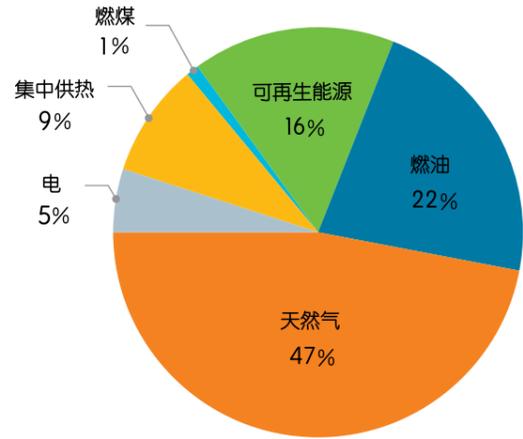


图2：不同建筑物类型和类别的终端能源需求



在德国，室内采暖和热水供应主要依靠燃气锅炉，占该领域终端能源需求的47%；其次是燃油，占22%（图3）。集中供热主要用于大城市，覆盖9%的终端能源需求；2018年，可再生能源供热的占比达16%。可再生能源供热约90%的能源来源为生物质能，其中大多为居民家庭出于舒适性原因用于生物质采暖炉具作为已有供热系统的补充。

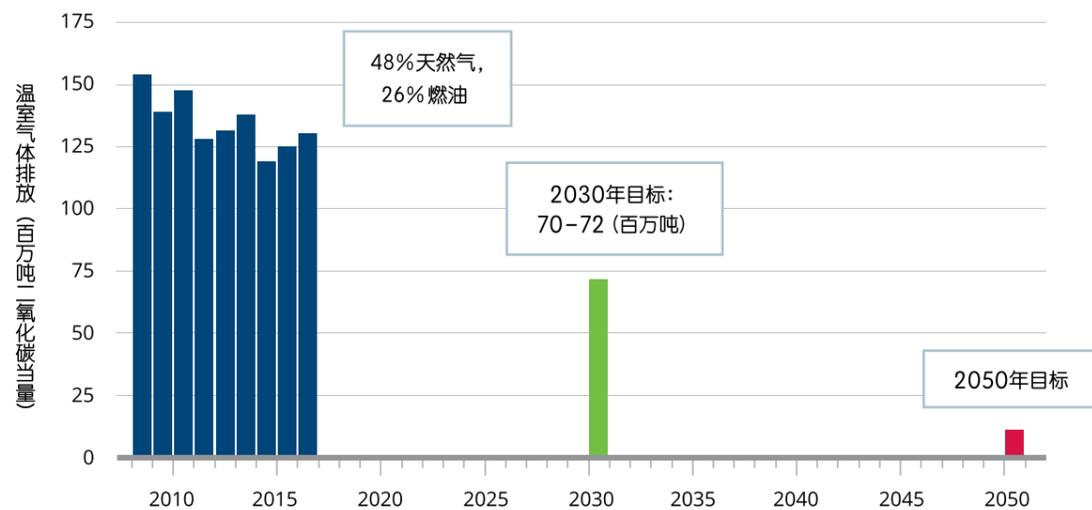
图3：2018年供热领域不同能源载体在终端能源需求中的占比



来源：IREES基于[1]自绘

德国可持续供热和制冷政策旨在使德国的供热和制冷领域完全实现去碳化。

图4：德国建筑领域温室气体排放和2050年目标



来源：改编自[5]

支持建筑领域可持续供热和提高能效措施的主要政策是提供投资补助以及设定建筑物能效标准、可再生能源供热设备的安装和使用义务（图5）。



@Shutterstock 726913807,Eskoma

图5：德国至2019年有效，支持可持续供热的主要联邦政策工具

	经济支持	法规/税收
可再生能源供热	市场激励计划 投资补助、针对可再生能源供热设备投资的软贷款	可再生能源供热法 新建和公共建筑一定比例的供热/制冷需求必须由可再生能源来满足
能效	德国复兴信贷银行建筑节能改造/新建节能建筑项目 低息贷款/节能建筑还款补贴 支持力度视项目最终一次能源需求而不同	节能条例 规定新建和既有建筑一次能源需求上限值 建筑物组件传热系数
其他能源领域	可再生能源法/热电联产法 可再生能源热力入网价格调整机制 热电联产供热补贴	能源税法 化石燃料消费税，提高可再生能源热力生产的经济效益

此外，联邦政府，州和城市层面的一些宣传活动同样旨在提高可持续供热技术的市场份额。其中，最重要的支持政策包括能源咨询支持、现有供热系统强制性能源绩效标签或长期改造路线图。在集中供热可持续供热解决方案方面，热电联产法和“集中供热4.0”支持计划是最为相关的政策机制。

支持机制的进一步发展取决于强制性节能和温室气体减排目标。在德国能源转型和气候行动计划的整体指导框架下，供热领域也制定了雄心勃勃的中长期目标：

- 2008-2020年期间，减少20%的建筑领域终端能源需求
- 至2020年，可再生能源作为供热和制冷的能源来源需增加14%
- 2008-2050年期间，建筑领域非可再生一次能源需求应减少80%
- 至2030年，建筑领域的温室气体排放较1990年相比减少40%

2019年10月发布的新的德国联邦政府2030年气候保护计划预计将能效措施和可持续供热相关的所有支持计划整合到一个方案中。新方案将在原德国复兴信贷银行项目和市场激励计划（MAP）共计23亿欧元资金的基础上再额外增加8.4亿欧元。

元。针对将老旧供热系统更新升级为可再生能源供热装置如热泵、生物质锅炉/炉具和太阳能供热设备的特殊补贴将显著增加。“可再生就绪”的天然气冷凝锅炉也将获得补贴。此外还将为自住建筑引入一项新的税收抵免支持计划。

为了加速可持续供热的转型，从2026年开始德国将禁止新装不与可再生能源供热结合使用的采暖燃油锅炉。现有法规也在不断追求将能效措施和可持续供热政策进行结合：可再生能源供热法和节能条例将被整合成一个新的法案，即“建筑能源法”。

- 2030气候保护计划还新增了供热和交通领域化石燃料二氧化碳排放定价收费机制。二氧化碳价格将从2021年以每吨10欧元开始进行收费，这就意味着天然气终端用户所需要支付的能源费用将上涨4%。建筑和交通领域二氧化碳收费机制将以类似于工业领域碳排放交易机制(ETS)这样的总量控制结合交易系统来实施。根据目前评估，预计至2030年二氧化碳价格将上涨到120欧元/吨。
- 燃煤电厂将被淘汰；《退煤法》有望于2019年颁布并将为硬煤发电厂提供监管和经济框架；对于褐煤电厂还将商定单独的淘汰时间表。这对大型集中供热系统来说影响巨大，因为必须将燃煤热电联产余热用可再生能源热源替代。芬兰已经决定在2029年采取这一措施。

3. 可持续供热技术选择方法

本研究在选择适应中国实际条件的可持续供热技术时的流程如下：

首先，选择了20种可持续供热技术，以长名单的形式对这些技术进行了初步的描述，并与中方专家进行了探讨。长名单主要涵盖供热（有时也包括供冷）技术和系统，其满足低污染物排放和低二氧化碳排放这两个要求。选择的标准主要包括：

- 所选技术需具有一定程度的创新性并有良好的未来前景。其中一些技术甚至从2030往后的角度来看都应具有创新性。
- 一些常用技术，如燃气和燃油冷凝锅炉等，没有被包括在内。
- 清洁煤技术（如以煤为基础的低排放技术，如粉尘排放）不在考虑范围内，因为这些技术仍然对气候有较大影响。所选择技术应该既为当地的减排做贡献（环境效益），也为全球的减排做贡献（气候效益）。

表1：分布式可持续供热系统

编号	分布式供热系统与技术	应用地区
1	低排放的小型固体生物质炉具	农村地区
2	加装光伏和热水器的空气源热泵系统	农村和城市地区
3	地源热泵	农村和城市地区
4	微型燃料电池热电联产加调峰燃气锅炉	农村地区
5	（低排放）生物质颗粒锅炉加太阳能热水器	农村地区
6	（低排放）生物质颗粒锅炉加光伏供暖及热水系统	农村地区
7	生物混合热泵，加装固体生物质锅炉（用于调峰）	农村和城市地区
8	带有冰蓄热的热泵及太阳能集热器（及光伏）系统	城市地区
9	带有热泵的光伏/光热集热器	农村和城市地区

表2：区域供热(DH)

编号	区域供热技术	应用地区
10	（粪污）沼气集中供热	农村地区
11	污水热回收系统	城市地区
12	带有热泵的燃气热电联产系统	城市地区
13	分布式热泵集中供冷	农村和城市地区
14	生物质锅炉、太阳能供热及季节性储热系统	农村地区

- 清单中没有包括那些在德国缺乏技术供应商或应用经验的技术（如秸秆锅炉）。

长名单所列技术主要分为三大部分，涵盖了从较为简单的、适用于个体用户的技术到更为复杂的大规模解决方案，特别是针对城市地区：

- 分布式供热系统(表1)
- 区域供热(DH)(表2)
- 大规模集中供热(表3)

基于长名单，本报告委托方中德能源与能效合作伙伴项目（德国国际合作机构实施）在参考中国电力规划设计总院的意见建议后，选择其中10项可持续供热技术作为短名单。这10项技术在下面表1和表3中加粗显示，并将在本报告第四章中得到细述。

表3：大型集中供热DH

编号	大型集中供热技术（含管网）	应用地区
15	大型热泵（河水源、地铁余热等）	城市地区
16	大型太阳能集热装置	城市地区
17	地热集中供热	城市地区
18	带有燃气热电联产、热泵和季节性储热的集中供热/冷网	农村和城市地区
19	工业余热回收系统	城市地区
20	带有可再生能源合成甲烷（电制气）的燃气热电联产	城市地区



4. 可持续供热方案的选择

本章各小节将展开描述第3章所选择的技术和系统，及其所涉及的技术路线、经济性和环境绩效，以及使相应技术得以发展的相关商业模式或框架条件。

本章目的并不是要详细地概述德国供热市场的整体发展情况，而是更细致深入地聚焦一些技术并着重介绍一些可能适

4.1 低排放的小型固体生物质炉具

固体生物质承担德国90%以上可再生能源供热。尤其是，可用于原木燃烧（也可燃烧其他固态燃料，建议使用气候中性的生物质燃料，例如木砖）的柴火炉已经非常流行。据估计，几乎四分之一的德国家庭都完全或部分使用木材供热。

但是，人们也开始担心此类锅炉的颗粒物排放问题，尤其是当操作此类锅炉的用户经验不足或者未接受过培训时（使用

用于中国情况的解决方案。本章的结构遵循第3章形式，即从小型分散式解决方案，到区域集中供热技术，再到大型城市集中供热基础设施这一顺序。

湿木材、装料不当、空气进气量错误等），其可能产生的排放水平会很高。

因此，新的产品被研发出来，可通过一级（炉膛设计、使用蓄热材料等）和二级措施以及空气及、燃料供应的电子控制来解决这一问题。

应用	主要用于农村建筑物或者采用分散供热的建筑物
目标群体/客户	主要是私人业主
优点	<ul style="list-style-type: none"> 使用碳中和燃料，并且减少颗粒物排放 锅炉/火炉的燃料成本低
挑战	<ul style="list-style-type: none"> 依赖用户操作行为 某些装置需要接电或维护，取决于具体技术
成本	在德国，一个典型的5千瓦低排放生物质火炉的投资金额：2000-4000欧（含安装，不带烟囱）；加装过滤器的情况下：大约1500欧元
CO ₂ 排放因子	20-40克/千瓦时



技术介绍

带颗粒物减排功能的小型生物质火炉主要依赖于两种技术备选方案：

A. 一级减排措施火炉：低排放水平的火炉和锅炉都基于设计优化的燃烧室，包括通过使用耐火材料（可存储热量并使燃烧条件更稳定）来优化储热性能；或者优化燃烧过程，例如促使废气经由火焰进行二次循环，以实现二次燃烧。因为可大幅降低未燃尽碳含量的二次燃烧以及废气流通中由气旋效应产生的质量力效应，这些所谓的双膛火炉已经可以实现非常好的排放水平。

图6：
颗粒排放优化的双膛火炉中的空气和烟气流动



来源：XE00S

减少空气污染和温室气体排放

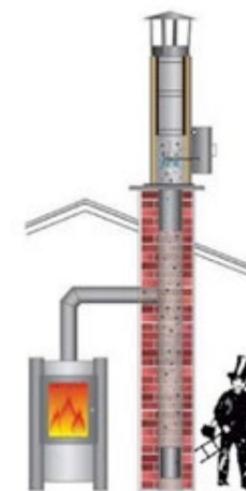
使用减排设备既可以燃烧气候友好型生物质燃料（从而减少二氧化碳排放），又可以大幅降低颗粒物的排放量，并且还大大降低未燃烧的碳氢化合物。即使在非最佳燃烧条件下，排放优化火炉的典型颗粒物排放也低于1毫克/立方米。但在不使用催化剂的情况下，使用此设备无法减少氮氧化物的排放。实际颗粒物减少率取决于很多参数，包括燃料、一级燃烧系统、系统的技术途径以及用户行为。在排放水平已经非常低的正常、连续运行情况下，沉淀效率可低至10%，而在部分负荷或非常规燃烧条件下，沉淀效率可能大幅上升，高达60%以上。火炉和小型燃烧装置的沉淀效率在20%到85%之间。通常情况下，实际实现的效率远低于铭牌上额定效率。详细综述见Struschka等人文件（2017）[1]。

市场发展

《联邦第一排放控制法案》（见下文）的出台大幅增加了燃烧后尾气处理的需求。据报道，在中间期内，每年售出多达30万套过滤改装系统，但过去几年时间里，这一数字有所下降，因为很多现有系统已经改造过了。小型设备市场被静电除尘器（“电过滤器”）系统所主导。针对采用一级措施的生物质火炉没有可靠的数据，因为统计数据无法根据设备的排放水平来区分。

B. 使用主动或被动过滤器技术过滤废气的二级措施。主动过滤器一般为电过滤器，使用电压在15000和30000伏之间的静电电荷。颗粒沉淀在烟囱壁上，可以通过烟囱清扫器这样的定期维护进行清洁。因此，过滤器的寿命不受定期更换间隔的限制。此类系统需要通电。这是最常用的技术。其他被动过滤器技术，如烟道气洗涤器或被动式陶瓷过滤器系统必须频繁（每一到两年）更换和维护，因而远没有那么常见。除了过滤器系统以外，电子设备也可以优化火炉和锅炉的运行。

图7：
木材及其他固体燃料火炉的过滤器可以安装在烟囱内或者集成到火炉中



德国的成本、经济和商业案例

小型、无减排功能的生物质火炉的典型投资成本最低300欧元起。但是，根据市场激励计划评估过程中的市场调查显示，一个带有一级措施、可减少颗粒物排放、5-8千瓦热的典型生物质火炉的过滤装置（一般为单个过滤装置），在德国的平均成本大约为每个过滤器1500欧元，此类过滤器对应的火炉供热能力在5-10千瓦热之间。这些过滤器也可以很容易地扩展到更大的容量。发热成本取决于一级供热系统。

通过以下三项政策措施，推动生物质锅炉和火炉的污染物减排：

1. 《联邦第一排放控制法案》（BImSchV）对火炉和锅炉的排放水平提出了严格的要求。针对新建的中央系统，允许的排放水平为颗粒物0.02克/立方米，一氧化碳0.4克/立方米（相关氧气含量13%）。对于现有系统，《联邦第一排放控制法案》准许其有过渡期。对于单个房间的壁炉，允许排放值因不同应用而异；房间加热器可排放0.04克/立方米的灰尘。

实际上，1985年到1994之间建成的很多火炉都已被更换，或者必须在系统中增加过滤器。系统所有人必须通过提供制造商证书、执行现场测量或者提供过滤器系统证书，证明其已满足《联邦第一排放控制法案》的要求。自执行《联邦第一

排放控制法案》以来，根据行业协会HKI的最新估计，大约有200万套系统已经被更换或升级，生物质供热的颗粒物排放下降了大约三分之一。

2. 市场激励计划（MAP）是一项为消费者安装可再生能源供热设备提供一次性投资补贴的财政支持项目。该项目由德国联邦经济和能源部（BMWi）提供资金支持。

市场激励计划（MAP）支持不同类型的生物质供热火炉包括木颗粒火炉（带水管接头）、木颗粒锅炉、木屑锅炉和原木气化锅炉。由于投资成本过低，小型生物质火炉并不在该项目资助范围内。

图8：私人家庭颗粒减排火炉示例



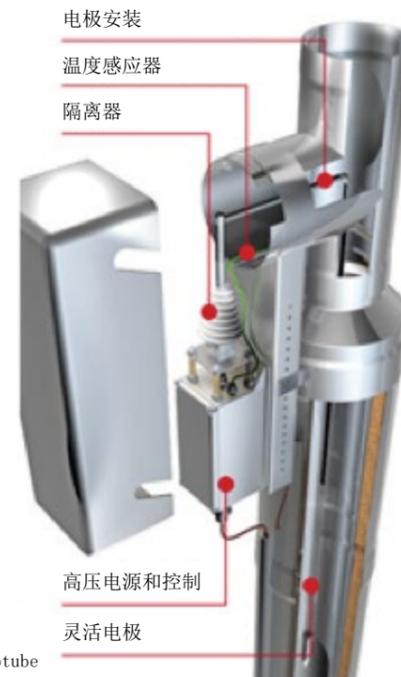
此类采暖火炉最适用于安装在私人独栋住宅建筑中（170平方米左右），能够覆盖此类建筑约30%的采暖需求。剩下的采暖需求则通过传统的采暖系统来满足。燃烧需要的

针对前面所提到的各项技术，市场激励计划（MAP）在原有生物质供热设备补贴基础上再增加1500欧元，如果还安装了额外的气体净化设备，则还将提供750欧元的现有锅炉气体净化设备改造补贴。具体可参阅满足市场激励计划资助项目技术要求的合格设备清单。

3. 排放形势严峻的地方市政府出台了“颗粒物警报”制度。当天气条件较差时，如逆温或低风速天气情况下，德国部分城市会禁止使用生物质燃烧炉、火炉以及某些特定锅炉。在这些日子里则只允许使用带废气清洁的系统。

木柴由当地生物质供应商配送，一部分则来自私人木柴供应商渠道。其中，回火处理的基本条件是保持木柴的干燥和清洁，并且在点火后约20分钟后再开启回火处理。

图9：现有生物质火炉改造



来源：Schräder Ökotube

根据上文中提到的《德国联邦排放控制法案》，目前，成千上万的生物质炉灶已经过静电除尘器改造。这些系统通过静电过滤废气。这些系统待机模式下的电力需求往往小于1瓦，而过滤模式下的电力需求约为14瓦。

在中国进行试点安装的意见

一种可能的方式是在“试点村镇”或城区安装一些锅炉，以论证及测量基于客户行为的减排影响，按照描述，客户行为对结果有很大的影响。

中国生物质资源丰富，生物质能开发利用前景广阔。可作为能源利用的农作物秸秆、林业剩余物和能源作物等生物质资源总量每年约4.6亿吨标准煤，其中林业木质剩余物的规模最大，林业废弃物每年可作为能源利用量约3.5亿吨，折合标准煤2亿吨，占比为43%；农作物秸秆每年可作为燃料利用量约3.4亿吨，折合标准煤1.7亿吨，占比为37%。目前，中国生物质能年利用量约3500万吨标准煤，利用率仅为7.6%。中国北方地区的东北、新疆、华北均具有丰富的生物质资源。

初步统计，2018年中国北方地区分散式生物质炉供热面积约2500万 m^2 。分散式生物质炉初投资低，运行方便灵活、随用随开，可兼顾采暖和炊事，实际运行成本较低，一般家庭基本能够承受，在北方农村地区具有较大的推广应用潜力。

分散式生物质炉主要应用于北方农村地区以及长江流域夏热冬冷地区，尤其是东北、西北地区以及华北部分地区，一是清洁能源应用要求较高的地区，禁止或限制煤炭使用；二是不具备煤改气、煤改电基础条件的农村地区，分散式生物质炉具成为替代散煤的主要方式。

文中提到的低排放生物质炉适用于分户式采暖，目前适宜在私人别墅区或经济承受能力较好的农村地区先行试点，能够显著降低烟尘排放，推广过程中需要关注氮氧化物排放水平，满足当地环保要求；在燃料方面，由于不同地区生物质燃料种类不同，有木质、秸秆等，建议在中国不同地区进行试点，测试燃料适应性及污染物排放水平，并与当地环保要求对比；在炉子结构设计上，建议结合中国生活习惯，尽可能兼顾炊事。

生物质供暖目前面临的主要问题是环保问题，集中式锅炉或者分户式炉具目前都尚无国家统一排放标准，部分省份制定了生物质成型燃料锅炉排放标准，比如天津市要求生物质锅炉颗粒物、二氧化硫、氮氧化物排放限值分别为 $20mg/m^3$ 、 $30mg/m^3$ 、 $150mg/m^3$ ，满足地方标准的集中式生物质供暖是政策鼓励的。而分户式生物质供暖由于排放监管较难，目前政策并无明确鼓励推动。分户式生物质供暖运行灵活，运行成本较燃煤低，中国农村地区一般家庭基本能够承受。

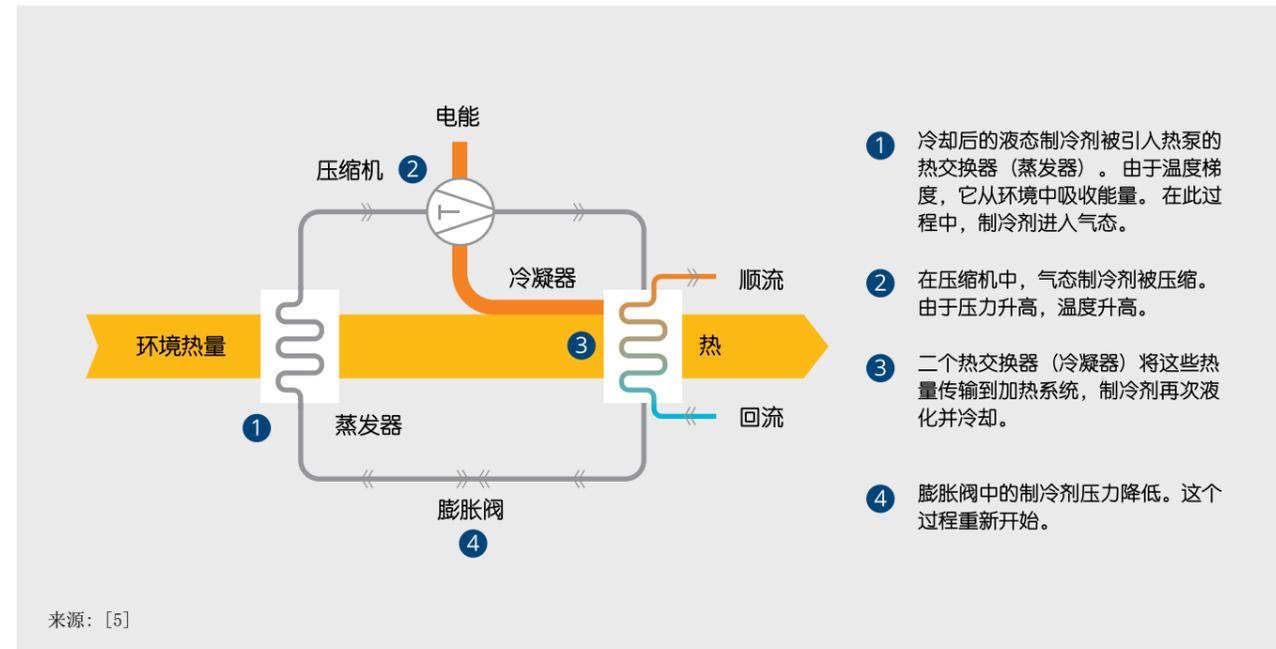
4.2 加装光伏和热水器的空气源热泵系统

在低温时，热泵利用热源产生的热量，提升温度；在高温时，热泵提供散热功能。德国安装的大多数热泵采用电动机驱动机械压缩机（参见图10）。

空气源热泵使用户外空气或建筑物内部的废气。空气源热泵是一项标准技术，尤其是针对新建筑。太阳能光伏组件和配有集成电热元件的生活热水蓄热设备在商业上也已发展

完善，广泛安装于各种不同类型的建筑。但是，融合这三项技术作为分散式热电联供系统是一种创新的热电系统。在德国，如果企业可以在一天的特定时段内通过控制或者适当的关停热泵机组也可以有效的减少机组电费。因此，即使关闭了热泵，蓄热装置和光伏组件也能在热泵机组关停的时间里提供热量。

图10：电驱动热泵原理



应用	通过热泵实现住宅及非住宅建筑的供热、热水供应及制冷。
目标群体/客户	新建或翻修独户住宅的所有人/投资人。
优点	<ul style="list-style-type: none"> 使用环境热量和太阳能发电 三大组件都是已经验证的可靠技术，其创新之处在于集成了智能控制设备 由于缩短了切换时间，热泵使用寿命延长 提高分布式发电的就地消纳 减少温室气体排放
挑战	<ul style="list-style-type: none"> 要实现空间供热热泵的有效运行，建筑物内的热配温度须低于55℃ 在电价和化石燃料价格差价低的国家具有成本效益
成本	<ul style="list-style-type: none"> 取决于所供应建筑能源绩效。 在德国，根据所安装设备系统的大小，投资成本一般在855-1630欧/千瓦热之间。屋顶光伏系统（包括逆变器模块）的投资成本在800-1500欧/kW_{peak}。并网成本在500-1000欧[9, 10]。一整套适用于典型的独户住宅建筑的集成系统，其中包括功率为15kW_{th}的空气源热泵，10平方米的屋顶光伏设备，需要约34500欧元的投资成本。 平均供热成本：20欧分/千瓦时，取决于满负荷时长（标准的冷凝式锅炉13欧分/千瓦时）
CO ₂ 排放因子	130g/kWh _{th} （有用的热能）/如果将馈入电网和用于家电的光伏电力光考为避免的排放，则为零排放或负排放（假设当前德国电力结构的平均排放因子为570g/kWh _{e1} ）



技术描述

空气源热泵的类型

空气源热泵可能因为热源和热输配介质的不同而有差异。废气热泵是较小型的设备，主要是用作带自动通风系统及其他供热系统的热量回收系统。空气源热泵作为一级供热系统时，通常使用户外空气。取决于个别建筑物的具体要求，空

气源热泵可安装在建筑物内部或外部，或者分体安装，在外部配备通风设备。热输配可采用水基系统（参见地源热泵中的描述）或空气基系统。所有系统类型都具有类似的光伏系统和热水储罐集成。

表4：地源热泵的不同系统组件

	废气热泵	空气源热泵
热源	废气	环境热量
集热器	热交换器	通风设备
设备类型	单体式内部	单体式内部 单体式外部 分体式设备
热输配/冷输配系统	风机盘管	
	散热器 → 流体温度55°C	
	辐射供热/地暖 → 流体温度35°C	
	热主动式建筑构件	

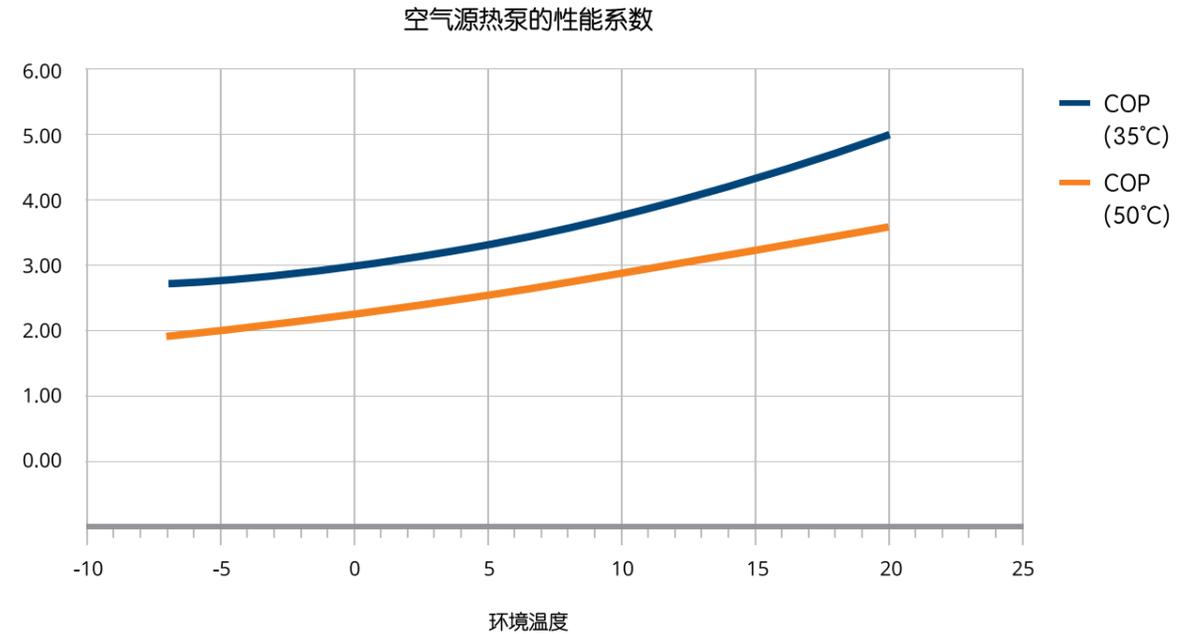
容量和供热量

在住宅建筑内，用于区域供热和热水供应的典型空气源热泵的功率为10到20千瓦热。仅供应生活热水的热泵功率最低为2.5千瓦热。在多个热泵构成的梯级回路中，功率表可能增加到100千瓦热以上。典型空气源热泵的流动温度最高可达60°C。热泵在较低温度下的运行效率更高，要实现经济、生态上的合理运行，温度须低于40°C。

热泵的效率以性能系数（COP）表述，此系数描述的是热能输出和电能输入的比例。图3展示的是35°C和50°C供给温度下，

性能系数与环境温度的函数关系。地源热泵的效率更易受到环境温度的影响。但是，热输配系统的流动温度对性能系数的影响更大。在温度低于-5°C的时候，为了弥补环境温度和流动温度之间的巨大差异，通常有两种做法：环境热泵与另一供热系统构成双热源系统，或者采用配备蓄热和电热元件的单电力热源系统。如果周围环境温度过低，热泵无法满足所需温度时，电热元件则作为补充提供支持。在计算年度热性能系数时，应考虑到一年当中电热元件是使用的电量。空气源热泵的性能效率可以达到3.5到4.3。

图11：不同供热温度下性能系数与环境温度的函数关系



来源：资源效率和能源战略研究所（IREES）基于DIN V 18599-5的自我描述 [6]

配备光伏和生活热水蓄能及电供热元件的空气源热泵

组合系统使用可再生能源作为热泵的电力驱动，从而提高光伏系统的自发自用电量占比，减少供热的二氧化碳排放。此外，光伏装置与热水箱供热元件直接连接，在供热期以外的时间，可以关停热泵。因此，为实现单个系统组件的最优运行，可能要考虑可变电价、单个负荷曲线和天气预报。根据电价制度，系统可能按照以下次序运行。

1. 光伏发电用于给家用电器供电
2. 光伏发电用于在供热期为热泵运行供电
3. 在供热季以外，启动光伏供热元件以提供热水
4. 在供热季，如果温度对热泵而言过低，可启动光伏供热元件作为空间供热的热源
5. 如果光伏发电量不够，使用电网电力为热泵和家用电器供电
6. 光伏发电上网（剩余电能）

系统也可以加配电池蓄能装置。热泵与光伏系统之间的通信为标准化-智能电网（SG）就绪接口[8]。使用此接口，可以直接将热泵插入光伏逆变器。因此，可以设定将电力用于热泵供电的最低发电量的特定门槛值。这样只能实现上述控制策略的第1步和第2步。为了实现整合式方法，需要知道针对哪些负荷，须安装智能电表和能源管理系统（EMS）。现代光伏逆变器已经安装了（能源管理系统）软件，不仅能考虑到不同家用电器和热泵的负荷，还能考虑到互联网提供的实时天气数据。

应用

空气源热泵主要安装在新住宅建筑和小型非住宅建筑中。它们通常用于空间供热和生活热水制备。热泵最适合新建筑或者隔热良好、带地板采暖的现有建筑。在较低的运行温度下，热泵的运行效率更高。通常情况下，可以为实用面积小于250平方米的建筑物供热。空气源热泵还有提供制冷的可能性。

与多户建筑相比，光伏与电力供热元件组合供应生活热水的方式更适合独户住宅，因其屋顶面积和居住空间的比例更有利。非住宅建筑也适合使用光伏与空气源热泵的组合。因为非住宅建筑的热需求往往较低，所以，不建议采用与生活热水电热器的组合。配有电池蓄能装置的系统更适合此类建筑。

减少空气污染和温室气体排放

空气源热泵不会产生直接排放。温室气体排放减少量取决于光伏系统自发电量的比例以及电网发电造成的温室气体排放。配备智能能源管理系统的此种系统也可能考虑到分散运行行程中的电网实时排放因素。

历史与市场发展

德国自2000年起颁行的支持方案和监管文件推动了热泵的安装（参见4.3）。2018年，安装8.4万个热泵用于供热目的，其中72%为空气源热泵[2]。在新建筑中，空气源热泵的市场占比为所有安装的供热系统的33%[7]。自从出台了保证上网电价的《可再生能源法案》以来，屋顶光伏装置在独户住宅中的应用变得尤为广泛。过去15年间，技术成本下降，

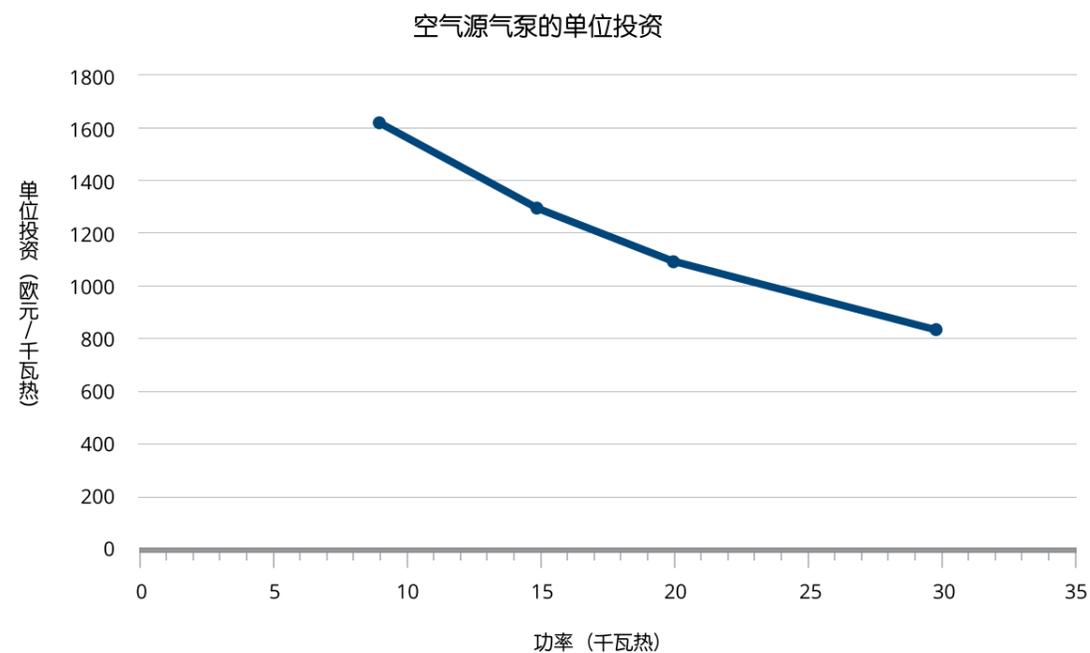
电价上升，因此将屋顶光伏发电自用比接入电网更具经济效益。将热泵和太阳能光伏与蓄能系统及智能控制系统彼此集成仍然是一个利基市场。随着上网电价的上升和化石燃料价格的下降，预计在未来5到10年间，光伏电热的应用将在市场上占到很大的比例。

德国的一些经济和商业案例

投资和运维成本

对于空气源热泵系统，包括热水蓄热、空间供热以及空气源热泵的安装，其平均专用性投资成本在855欧元/千瓦热到1630欧元/千瓦热之间，取决于系统的规模（图12）。

图12：德国空气源热泵的单位投资



来源：资源效率和能源战略研究所基于[8]的自我描述

屋顶光伏发电系统的投资成本，包括逆变器模块，在800欧元到1500欧元/千瓦峰值功率之间，逆变器和装配系统的成本为330欧元/千瓦。电网连接的成本在500到1000欧元之间

[9, 10]。适合典型独户住宅的一体化系统，包括15千瓦热的空气源热泵和10平方米的屋顶光伏装置，所需投资成本在34500欧元左右。

表5：带光伏和生活热水电热器的空气源热泵的单位投资

组件	单位投资
空气源热泵、蓄热装置、控制系统[15千瓦]	1631 [欧元/千瓦]
光伏系统[10平方米]	1400 [欧元/平方米]
光伏上网	500 [欧元]
光伏电热元件[3千瓦]	750 [欧元]

平准化供热成本

年运维成本为投资成本的1%左右。能源成本取决于可为热泵运行供电的可用光伏电量的占比以及热泵专用电价的可用性。

针对典型的新建独户住宅，我们按大约20欧分/千瓦时计算一体化系统的平准化供热成本，不计投资补助。标准燃气冷凝锅炉的平准化供热成本大约为13欧分/千瓦时。

图 13：拉亨多夫（Lachendorf）义务消防队



消防队的房舍建于2014年。安装了两个空气源热泵用于空间供热和生活热水制备。通过房间内的辐射供热系统进行热输配。房间提供三种不同的温度水平，取决于用途

计划以及所执行的具体活动。屋顶装有为蓄电池供电的光伏模块，此蓄电池是用于在停电期间保障供电。[1]

图 14：罗斯拉特（Rösrath）的多户住宅



此栋多户住宅建于2011年。此建筑共有七间公寓，总面积为541平方米，住着11个人。空气源热泵通过辐射供热实现空间供热。建筑物内使用地暖进行热输配。热泵的功率为22.4千瓦，年均性能系数COP在4.03左右。在此案例中，热泵集成了光伏模块，实现了最佳能源效率。[2]

图15: 罗特 (Roth) 物流中心



其供热系统由空气/水源热泵，配有60平米平板集热器的太阳能集热系统，一个盐水/水热泵和一个有效容积700立方米的地下储罐组合而成，装置吸收的太阳能可将储罐中介质加热到最多38℃。在供热期内，太阳能热作为盐水/水热泵的热源。整个供热系统所需的电量主要来自

于装机容量86.5千瓦的光伏系统。环境中产生的用于给大厅供热的能源可折算成大约5.1万升采暖燃油的当量。藉此产生的电量以及以环境友好型方案取代化石燃料发热，给罗特带来了每年159000千克的二氧化碳减排。[3]

空气源热泵的政策支持

为加强建筑部门的温室气体减排，德国颁行了多项提高可再生能源供热比例的支持计划和监管文件。国家层面上，主要的热泵支持计划是市场激励计划[7]。此计划不仅提供投资补助，还设定了与技术质量和效率相关的市场标准，提高了创新系统的扩散度。针对热泵，此计划中提供了两项资助：

- 市场激励计划 (MAP) 基础资助，现有建筑物内安装有效热泵 (空气源热泵的年性能系数 ≥ 3.5)。地源热泵的补助金额在1300欧元到1500欧元之间。
- 市场激励计划 (MAP) 创新资助：在现有或新建筑中安装高效热泵 (年性能系数 ≥ 4.5)。要求：辐射供热并在一年后需进行质量检查。在现有建筑中，补助金额大约为1950欧元到2250欧元之间。在新建筑中，补助金额大约为1300欧元到1500欧元之间。

除了此项资助以外，对于附加效益，还有额外津贴补助。

- 组合津贴：与太阳能或生物质系统或热网络连接相结合的额外津贴。此项津贴补助大约为500欧元。

- 效率津贴：满足“德国复兴信贷银行能效房屋55”对围护结构的要求。只针对现有建筑。此项津贴补助为基础资助或创新资助的+50%。
- 工作负荷管理津贴：蓄能至少30升/千瓦，符合智能电网 (SG) -就绪指导方针的接口。此项津贴补助大约为500欧元。
- 能效激励计划 (APEE) 津贴：更换低效的化石燃料锅炉、夜间蓄热或电加热与优化措施相结合。此项津贴补助为总资助的+20%。
- 能效激励计划津贴：优化措施包括供热检查、液压平衡或效率提高措施。此项津贴补助大约为600欧元。

还有另一项由德国复兴信贷银行 (KfW) 负责的补助项目。其中包括两个主要资助项目，分别为建筑节能改造和新建节能建筑。该项目为既有建筑通过节能改造后，或新建建筑达到建筑物规范所要求的节能性能标准的项目提供资金支持。该标准由建筑自身的能效性能和与根据建筑标准的参考建筑相比最大的一次能源消耗来定义。例如，一个“KfW效率房55”仅消耗与建筑法规标准相比一次能源的55%。而节能措施与安装可再生能源供热系统 (例如热泵) 相结合有助于达标。

在中国进行试点安装的意见

试点项目可能有两个焦点区域：一个是农村地区，另一个是较大规模的城市。

- 在独户家庭住宅或楼宇、工厂、园区中安装分布式供热系统
- 供热/制冷应用相结合
- 废气热泵适用于工业地区或者不同废气来源地
- 与目前的分布式光伏系统相结合，提供电力的同时满足供暖需求。

空气源热泵与光伏、生活热水器联合系统，低位热源为空气，受当地可利用热源资源条件约束较小，适应地区范围较广。适合于太阳能光照资源较好，冬季室外最低气温 -5°C 以上的地区，作为城市集中供热管网覆盖不到区域取暖补充热源；城镇及农村地区集中社区取暖的主力热源以及部分经济较好地区农户分户取暖的热源。当室外气温较低时 ($T < -15^{\circ}\text{C}$)，空气源热泵性能会下降，因此供暖室外设计温度过低的地区建议不采用空气源热泵系统。该技术适宜作为城镇集中供热的补充热源及农村地区取暖主要热源方式之一。对家庭分散式供热而言，目前空气源热泵应用的较多，尤其在河南、河北、北京等地区。

在推广过程中，建议提高空气源热泵低温环境下的制热能力、能效和运行可靠性。中国政府通过“光伏扶贫”计划或分布式光伏“自发自用、余量上网”的补贴政策，近年来，家庭光伏或厂房、园区分布式光伏应用较多，光伏系统与空气源热泵相结合，一是能够供热制冷、提供生活热水和绿色电力，二是能够节省大量电网增容改造投资，三是能够同时享受光伏发电和清洁取暖政策支持，具有非常好的应用前景。目前，河北省等地制定了农村清洁取暖方案，大力推广“光伏+”供暖模式，部分村庄已有试点，效果良好。

4.3 地源热泵 (GSHP)

地源热泵 (GSHP) 使用储藏在土壤或地下水中的能量作为热源。是否适合采用地源热泵作为气候保护技术，取决于压缩机的用电比例、所产生的有效热能以及发电厂用于发电的能

源。下表总结了此项技术的主要应用、优点和挑战，此章节中亦另有详细描述。

应用	使用地热，通过压缩热泵实现住宅及非住宅建筑的空间供热、热水供应及空间制冷。
目标群体/客户	新建或翻修独户住宅的所有人/投资人。供热和制冷组合应用尤以新建的高能效办公楼为目标群体。
优点	<ul style="list-style-type: none"> 利用土壤中的热能 已经验证的技术 相比空气源热泵拥有更高的性能 存在制冷期使用自然制冷（不使用空调系统）的可能性 减少温室气体排放
挑战	<ul style="list-style-type: none"> 要实现有效运行，建筑物内的热输配温度须低于55°C 需要有足够的地热埋管/钻孔的空间 地面耦合（地下热交换器）方法所需的高投资 在电价和化石燃料价格差价低的国家具有成本效益
成本	<ul style="list-style-type: none"> 取决于所供应既有建筑的建筑物能源绩效 单位投资成本（包括安装成本）：1350-2200欧元/千瓦（热容范围：8-30千瓦） 平均供热成本：19欧分/千瓦时（取决于满负荷时长）
CO ₂ 排放因子	126克 / kWh _{th}

技术描述

地源热泵的类型

可再生热源包括空气、土壤（地热）、水、废水和废气。在工业环境中，任何产生热量的过程都会形成不同的热源，例如废热或废气。地热热泵利用地下水或土壤作为热源。

表6：地源热泵的不同系统组件

	水-水热泵	盐水-水热泵
热源	土壤	地下水
集热器	垂直埋管 孔深：1.5米	垂直埋管 孔深：40 - 100米 水平集热器 深度：~1.5米 面积：2 m ² / m ² 居住面积

热输配/冷输配系统	散热器 → 流体温度55° C	
	辐射供热/地暖 → 流体温度35° C	
	热主动式建筑构件	

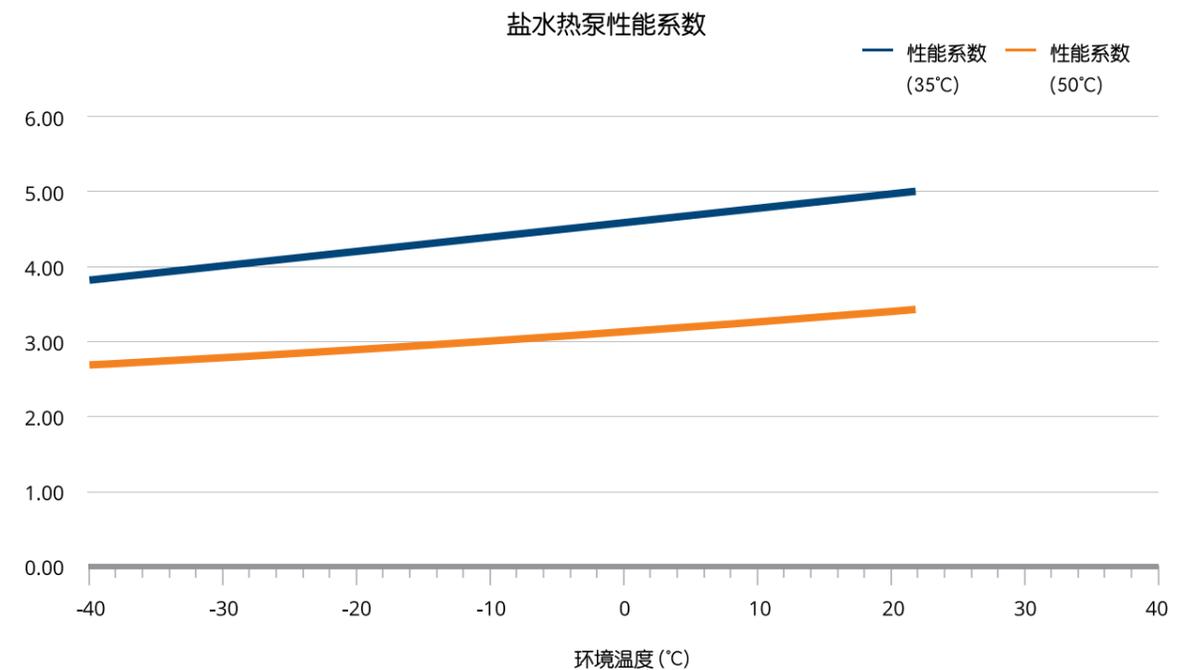
因此，储存在地下的热量被吸收，地下的自然温度被加以利用。取决于欧洲中部的气候和地理条件，此种地下温度大约为10°C。因此，热源和供热系统供给温度之间的温差在冬季较小，从而可以实现热泵的有效运行。出于此目的，有两种不同的热源系统可用：垂直地热埋管或水平地热集热器。两种系统属于所谓的封闭系统。必须有水基冷或热输配系统为建筑内的房间输送冷热能。压缩机的用电需求会随着热源与散热器之间温差的扩大而增长，因此，地暖供热或者热主动式建筑构件（例如冷却吊顶）等低温分布式系统最适合热泵。

容量和供热量

在住宅建筑内，用于区域供热和热水供应的典型地源热泵的容量为6到34千瓦_热。通过多个热泵的串行设置，容量可以提高到100千瓦_热¹。单级热泵可以供热到最高70°C。热泵在较低的温度下运行更有效率，所以要实现经济及生态上合理的运行，温度须在40°C左右。

图16展示的是35°C和50°C供给温度下，性能系数与环境温度的函数关系。图片揭示了环境温度对地热热泵绩效的影响远低于热输配系统的设计温度。

图16：地源热泵不同供给温度下性能系数与环境温度的函数关系



来源：基于DIN V 18599-5的自我描述 [6]

¹下面我们举一个独户住宅的例子，其居住面积为150平方米，空间供热和热水需求为100千瓦时/平方米。假设：光伏发电量的30%用于供热（热泵和电热器），30%用于家用电器，还有40%按照现行10欧分/千瓦时左右的上网电价接入电网。在计算中，家用电梯的自耗电量和上网电价被视为负成本/增益。德国家庭的现行电价：28欧分/千瓦时。热泵电价：20欧分/千瓦时。利率：4% 20年折旧期

但是，性能系数只代表给定时间点上特定参数的一个绩效指标。因此，评估热泵效率必须考虑电量输入以及全年的供热/供冷量。非常高效的地热泵系统可实现4.5及更高的年性能系数。

应用

地源热泵主要安装于新住宅建筑和翻修的现有建筑。它们通常被用于空间供热和生活热水制备。像空气源热泵一样，地源热泵最适合能在低于55°C的低热分布温度下运行的高效建筑。室外温度对地源热泵能源性能的影响较空气源热泵要低得多。可逆热泵也可能作为自然制冷装置，在夏季用于制冷。在德国，此种应用多见于非住宅建筑。在其他对制冷需求更高的欧洲国家，比如意大利和西班牙，可逆热泵更常被用作空调。

用于工业用途和区域供热的大型热泵变得越来越重要。但大型热泵依然是利基应用。

与其他技术的重要组合

热泵可与各种其他技术组合使用。为了减少供电的温室气体排放，热泵可与屋顶光伏模块相结合。随之而来的是光伏发电装置的自发自耗电占比提高，购自电网的电力消耗降低。在光伏上网电价低而电价高的情况下，光伏-热泵组合系统可能具有非常高的成本效益。此外，也可增配电池蓄能装置作为合理的补充，尤其是在存在灵活电价机制时。也可以与太阳能集热器组合使用，以降低必要的供给温度。

提高效率、实现灵活运行的重要系统组件是热水和储热水箱。凭借此种组合，在接入电网的可再生能源发电量占比较高、电价较低的时候，可以运行热泵。目前，热蓄能装置的投资成本远低于于电池蓄能装置，所以从电能到热能的能量转换比蓄电更有经济效益。取决于所安装热水蓄能装置的规模，可以满足6个小时到几天的用热需求。鉴于电力部门可再生能源发电量的波动性越来越高，此种蓄能装置可以实现热泵的灵活运行。另一方面，与用作季节性蓄能的冰蓄冷装置组合可大幅提高性能系数，降低电网在冬季的总负荷。热泵技术一般都能与扇区耦合的理念完美契合。它比其他技术省电，可全年供热，且能够大量运行。

但是，热泵的有效运行要求建筑物有高效标准。因此，必须有屋顶、外墙隔热以及节能型窗才能降低供给温度。

减少空气污染和温室气体排放

地源热泵不产生直接排放。但是，因为电力需求，其为温室气体减排所做之贡献取决于相应国家发电产生的二氧化碳排放。目前，中国的电源结构中煤炭占比较高，所以中国的排放量也高。与可再生能源发电相结合，就不会有进一步的排放。任何情况下，热泵的排放都低于电力直接供热。

历史与市场发展

有记录的地源热泵应用最早可追溯到1948年的美国[11]。德国及其他欧洲国家在1980年左右经历了第二次石油危机，这次危机造成了热泵装置市场销量的第一次大幅上涨，此后，地源热泵成为市售产品。大多数此类地源热泵都是增配到现有锅炉上，构成双热源系统。因为系统集成的复杂度高，安装人员又缺少知识和经验，此类系统性能问题频发。因此，建筑业主对此项技术的接受度和信任度消失殆尽。在德国，其年销量在1980年一度达到峰值25000，而到1990，这一数字降到1000以下[11]。类似的发展状况同样发生在法国、奥地利和瑞士。已进入热泵市场的大型锅炉制造商关停了相关的业务部门，小公司则接连倒闭。只有少数有经验的公司坚持经营此业务2000年，随着针对可再生能源供热技术的市场激励计划的出台，这批公司成为了第二次连续市场增长的中坚力量。此计划为热泵、生物质锅炉和太阳能供热装置提供投资补助，直到今天。自2009年起，一系列监管政策的颁行，比如建筑规范要求以及新建筑须使用可再生能源供热的义务等，进一步推动了热泵装置的发展。

2018年，德国出于供热目的而售出的热泵有84,000套，其中28%为地源热泵，剩余的72%为空气源热泵[4]。藉此，地源热泵在年度安装的供热系统总市场上的占有率达到3%。在新建筑中，地热热泵的市场占有率为7.6%，33%以上的新建筑都安装了空气源热泵[7]。

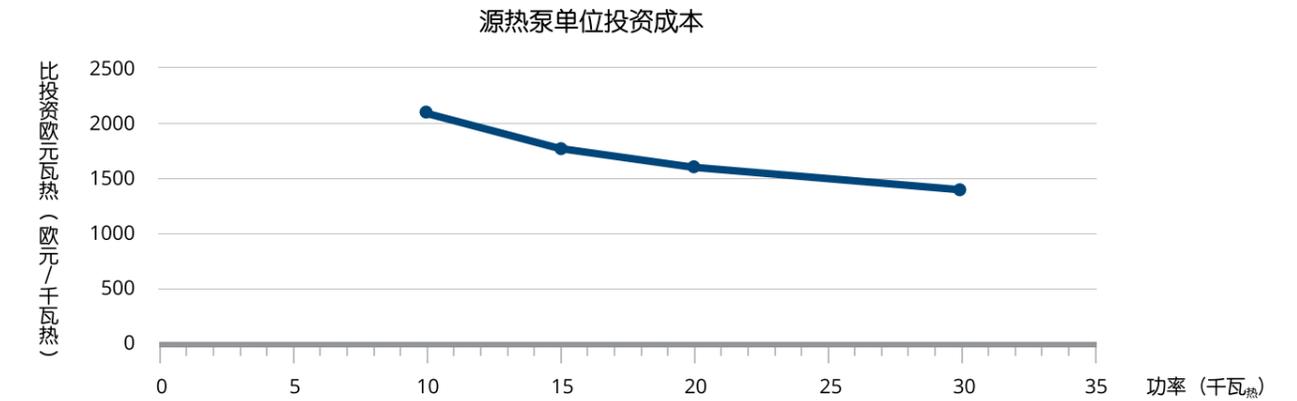
德国的经济学和商业案例

文本框中介绍的实例展现了地热热泵与其他技术的组合应用。选择的实例强调了与热泵进行技术组合的各种可能性。德国的大多数地源热泵都是独户住宅使用的单独热泵。

投资、运维成本、能源成本

在德国，容量在8到30千瓦之间的地源热泵的专用性投资成本，包括安装成本，在1,350到2,200欧元/千瓦之间。也就是说，其投资成本比标准燃气锅炉高出3到4倍。完成地源热泵的热源部署所需花费的精力，也远高于空气源热泵。它需要购买水平地热集热器或者为地热埋管钻孔，其中还涉及试钻、温度评估等流程。

图 17：德国地源热泵的单位投资成本



来源：资源效率和能源战略研究所基于[8]的自我描述

运维成本大约为投资成本的0.5%。所使用的热源不同，运行成本也不同。能源成本及随之而来的成本效率很大程度上取决于建筑物的总体能源绩效，因为要求有较低的供给问题

(见上文)。尤其是对没有隔热的老旧建筑和老旧的散热器而言，热泵并不是一个很好的选择。

图18：哈恩（Haan）的老旧泵站 — 一栋再利用的非住宅建筑内配有冰蓄冷设备的热泵



计划在这里办公的四家公司协力，通过复杂的流程，对这栋建筑进行了现代化改造。老旧的泵站被部分拆建，打造出了一个1000平方米的新办公区域，现在作为几家公司的总部。这些办公室通过一个带冰蓄冷设备的地热热泵进行供热或制冷。此外，通过将供应气体和废气进行热回收保障了能源效率。蓄冰池的尺寸为八米乘两点

二米高。因此，可蓄冰量为110平方米。建筑上的太阳能吸收器可以吸收太阳热能，储存在低温蓄冰池内的水中。如果需要热力为办公区供热，蓄冰罐会将热量传输到热泵。热泵使用地热和太阳能热产生热量。其功率为42.8千瓦，年均性能系数为4.3。[5]

平准化供热成本

针对一个典型的独户住宅，居住面积150平方米，供热需求100千瓦时/平方米，其平准化供热成本（LCOH）为19欧分/千瓦时。为了评估经济效率，需要将标准冷凝锅炉作为可供选择参考技术，进行平准化供热成本比较，标准冷凝锅炉的平准化供热成本为13欧分/千瓦时。

地源热泵的政策支持

为加强建筑部门的温室气体减排，颁行了多项提高可再生能源供热比例的支持计划和监管文件。国家层面上，主要的热泵支持计划是市场激励计划[7]。此计划不仅提供投资补助，还设定了与技术质量和效率相关的市场标准，提高了创新系

统的扩散度。针对热泵，此计划中提供了两项资助：

- 市场激励计划（MAP）基础资助，现有建筑物内安装有效热泵（空气源热泵的年性能系数 ≥ 3.8 ）。地源热泵的补助金额在4000欧元到4500欧元之间。
- 市场激励计划（MAP）创新资助：在现有或新建筑中安装高效热泵（年性能系数 ≥ 4.5 ）。要求：辐射供热并在一年后进行质量检查。在现有建筑中，补助金额大约为6000欧元到6750欧元之间。在新建筑中，补助金额大约为4000欧元到4500欧元之间。

除了此项资助以外，对于附加效益，还有额外津贴补助，详见章节4.2。

图19: Freiberg Instruments 公司总部——办公楼的空间供热和空间制冷



Freiberg Instruments公司的总部大楼采用配备光伏模块的地源热泵供热。使用深度120米到130米的四个地热埋管收集热量。地热能不仅可以在冬天为大楼供热，在夏天还可以提供制冷。之后，热泵利用地下相对较低的

温度，通过将过量热导入地下重新生成热源。热泵系统的设计供热负荷为45千瓦，制冷负荷为50千瓦。年性能系数为4.8的热泵，已被证明可以实现高于平均水平的效率。[6]

如上文所述，德国复兴信贷银行为大规模翻修或配有热泵的新建筑提供额外的资金支持。

图20: 日内瓦机场东翼楼 — 航站楼的大型地热热泵



这几年，日内瓦机场东翼楼一直在翻修，将于2020年重新开放。其能源供应是基于一个包含逾百个地热埋管的地源热泵，光伏模块面积5000平方米，配有雨水收集装

置，利用自然光。使用地热能源满足供热和制冷需求是其翻修理念的核心。有两个功率600千瓦的热泵。通过板式散热器供热，实现整个建筑的供热。[7]

在中国进行试点安装的意见

试点项目可能分成两个区域。一个是在较大规模城市的周边区域，即开发新建建筑区的地方，以分散系统或分布式的形式，进行试点安装。寒冷地区可与供热网相结合。在中国，不仅有供热需求，也有制冷需求，所以通过可逆热泵将供热和制冷相结合是一个具有成本效益的选择，尤其是对新住宅和非住宅区而言。这与德国相反，在德国，地源热泵主要安装于独户住宅，所以在新开发住宅区的大型多户住宅内进行试点，可能会更让人感兴趣。第二项试点安装是在农村家庭式或者独栋建筑、厂房园区内，将小型地源热泵与针对较小型建筑物的基础能效措施相结合应用，河北等地部分村庄整村采用分户式地源热泵技术。

地源热泵既可以作为分散式家庭供热制冷，也可以用于公共建筑供暖和制冷，作为集中供热的补充。中国地源热泵供热已经具有一定的应用规模。地源热泵目前应用较多的是公共建筑集中供暖和制冷，分散式地源热泵一般用于私宅或者别墅，河北、河南等地农村地区也有示范应用。地源热泵适宜于地质条件良好、易于埋管的公共建筑取暖和制冷。

地源热泵在使用中要注意建筑年均冷热负荷的平衡问题，地下埋管全年对地下土壤的取放热量不一致时，会造成土壤热失衡，影响土壤热泵系统长期高效运行。单一制热或供冷热泵机组长期使用无法保证效果。另外，受地质条件和可利用地下空间限制，土壤源热泵初投资及施工难度较大，同等规模供热量时投资高于空气源及地表水源热泵。

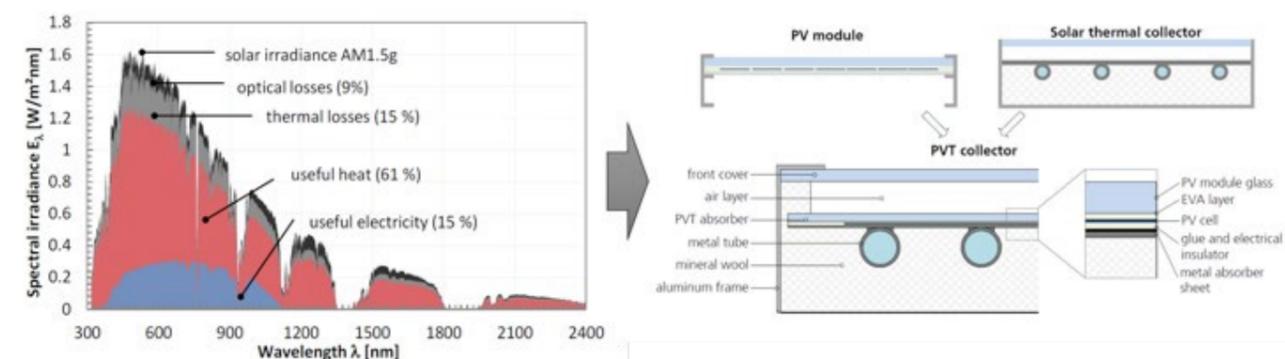
由于多地采用分时电价政策，地源热泵与蓄热（冷）相结合，可以利用夜间谷段低价优势，用热泵机组将热（冷）储存起来，在白天可以不开或少开热泵机组，从而降低运行费用，分时电价差越大，收益约明显。带有储能的地源热泵技术近年来在北京、天津、山东等地均有实际应用，比如山东济南动力公司采用地源热泵+水蓄冷（热）系统，满足2.2万平方米工厂的用热用冷需求。储能系统的应用主要取决于带来的利用低谷电的电价优势与投资成本相比的经济性。

4.4 带有热泵的光伏/光热集热器

光伏模块最多可以将22%的太阳辐射照度转换成电能。即使电池效率进一步提升，但大部分太阳光谱还是无法利用，而是作为过量热释放到环境中。混合光伏光热（PVT）收集器可以利用光伏电池中产生的过量热，将其传输到导热介质中，用

于热水和空间供热(图21)。因此，与光伏模块和太阳能集热器的非耦合运行相比，光伏光热收集器是可以实现更高系统效率和更好面积利用率的热电联产设备。

图21：来自太阳辐射的有效热能和电能以及光伏光热收集器（PVT）和热泵的原理图解



来源：[12]批量生产

光伏光热收集器可与任何分散式供热系统相结合。但是，与热泵和蓄热器的组合是最优的系统设计，可以提高每一组件的运行效率，尤其是在系统用于四种用途时，即空间供热、热水、工件制冷和电器用电。将过量热传输到蓄热器中，可同时冷却光伏模块，提高光伏发电的效率。可以将太阳能吸

收器设计成热泵的集热器，以代替地源集热器或者环境空气收集器。因此，空气源热泵可以更高效地运行，传统分离式安装的通风机已经过时了。

关于不同类型的空气源或地源热泵的描述，参见章节4.2和4.3。

应用	利用太阳能和环境能量提供空间供热、热水和空间制冷的热电联产
目标群体/客户	主要是独户住宅、办公楼和百货业建筑以及公共建筑的所有人/投资人
优点	<ul style="list-style-type: none"> 利用环境热量和太阳能供热发电 对屋顶面积的最佳使用，用于发电发热以及热泵的集热器 光伏装置的冷却将发电量提高了7%到10%，延长了光伏电池的使用寿命 与传统热泵系统相比，效率更高，空间要求更低 与配备通风设备的空气源热泵相比，没有噪音污染 提高分布式发电的自发自用电量 减少温室气体排放
挑战	<ul style="list-style-type: none"> 要实现空间供热热泵的有效运行，建筑物内的热输配温度须低于55℃ 在电价和化石燃料价格差价低的国家具有成本效益 在德国的气候条件下，其稳健性已通过验证，而对于供热季温度大幅下降的地区 因为集热器结霜而造成的功能限制还需要测试
成本	<ul style="list-style-type: none"> 取决于所供应建筑存量的建筑物能源绩效 如果光伏光热收集器达到每年超过20,000平方米的批量生产，则其投资成本与配有光伏系统的空气源热泵类似 [13] <p>技术尚处于早期市场扩散阶段，作为集成系统进行分销和大规模生产可能会使成本下降</p>
CO ₂ 排放因子	108 g/kWh _{th} (被利用的热能)/零排放或者负排放如果将用于家庭自用的来自光伏系统发的电算入在的话 ²

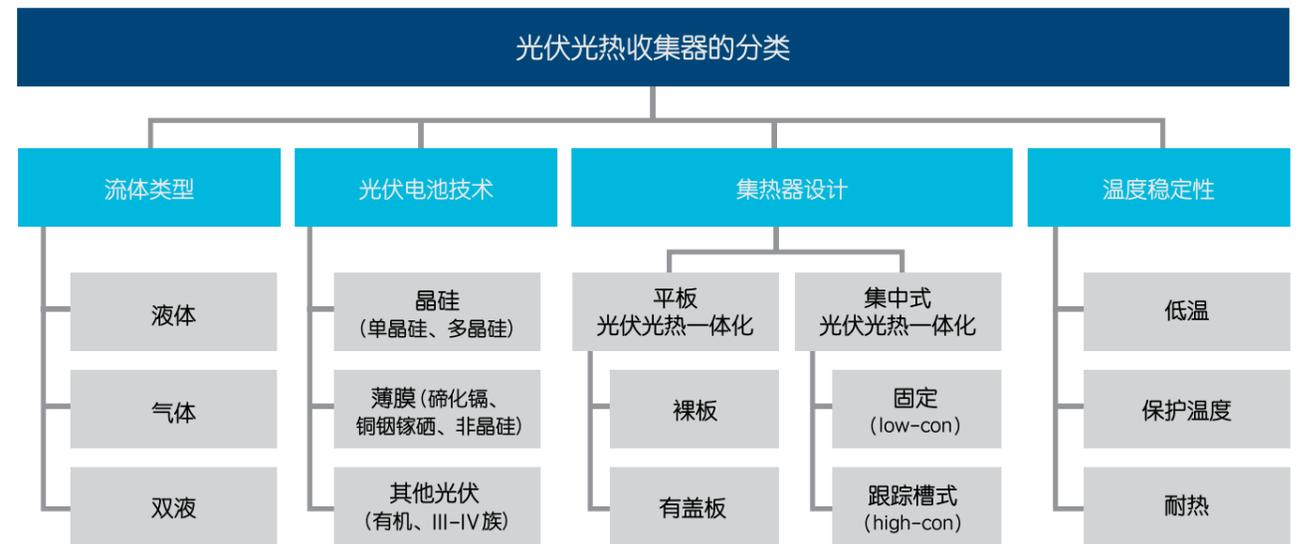
技术描述

光伏光热收集器的类型

参照热电联产的术语，光伏光热收集器是发电及发热耦合的太阳能热电联产设备。太阳能集热器通常在30℃到90℃的温度范围内运行，而光伏电池是在10℃到60℃的温度范围内运行。因此，组合运行的运行温度有一定的重合。但是，光伏模块的峰值效率以及太阳能设备的最佳转换因数发生在不同的温度范围，必须在系统设计中设定发电优先或者产热优先[12]。

光伏光热收集器可根据导热流体、光伏电池技术、集热器设计以及温度稳定性的类型进行归类（图22）。通过液体或空气实现热传递。大多数光伏光热收集器只用作传统的太阳能平板热收集器，以水和乙二醇混合物作为导热流体。光伏光热收集器与热泵的集成系统设计使用太阳能空气吸收器。因此，太阳能吸收器背部的表面是前面光伏模块的十倍[14]。关于模块和收集器，光伏模块可以部署任一种电池技术，集热器亦可采用不同的集热器设计。最后一个类别区分了光伏光热收集器的隔热。低温概念指的是以较低的隔热防止光伏电池出现临界温度。温度保护指的是以更好的隔热实现更少的热量损失。因此，可以实现更高的总体效率，通过过热保护，避免光伏模块出现临界温度。

图22：光伏光热收集器的分类



来源：[12]

容量和供热量

集成光伏光热-热泵系统可调整规模，既可应用于独户住宅，也可应用于多户住宅及非住宅建筑，例如办公楼或零售建筑。如果光伏光热收集器只用作热泵的集热器，则其最大容量由可用屋顶面积确定。热泵要求有3平方米/千瓦的模块面积。通过蓄热器中直接集成的电热舱可提供或支持峰值容量，这也是单个热泵的标准操作，可降低热泵的需用容量。此外，如果必要，可通过额外的地源热收集器运行系统。

热泵的效率以性能系数（COP）表述，此系数描述的是热能输出和电能输入的比例（参见关于地源热泵和空气源热泵的章节）。通过光伏光热收集器与热泵组合的优化运行，在35℃的低供给温度下，建筑物内的年性能系数可达到4.23 [13]。因此，系统无需为地源收集器钻孔，就可实现与地源热泵一样高的效率。

应用

此种系统的经济应用主要适合新的节能建筑。对于现有建筑，此种系统可用作现有锅炉之外的附加供热系统。其可扩展性取决于可用屋顶面积，所以它也可应用于非住宅建筑，例如零售业建筑和办公楼。也可与寒区供热网相结合。

减少空气污染和温室气体排放

热泵不产生直接排放。温室气体排放量减少取决于光伏光热系统中光伏部分自发电量的比例、热泵的总效率以及来自电网的额外电力造成的温室气体排放。配备智能能源管理系统的此种系统也可能考虑到分散运行排程中的电网实时排放因素。光伏光热系统的发热部分为系统的脱碳化做出了进一步贡献。

历史与市场发展

对光伏光热收集器的研究早在20世纪60年代就已经开始。只是近年来，随着光伏模块价格下降、针对现场可再生能源生产的监管政策和支持计划的颁行，行业和市场发展研究才再次被人关注。自2012年起，在德国的试点项目中，就已经形成了集成热泵实现最优运行的新收集器理念。在2018年，以光伏光热收集器作为盐水-水热泵的集热器就已经实现了商业批量生产[15]。还有另一个针对光伏光热收集器的大型应用研究与市场开发项目，获得了德国联邦经济与能源部的支持，自2019年初开始执行[16]。

因此，光伏光热收集器和集成热泵的系统依然处于早期市场阶段。但是，市售系统的前景广阔。

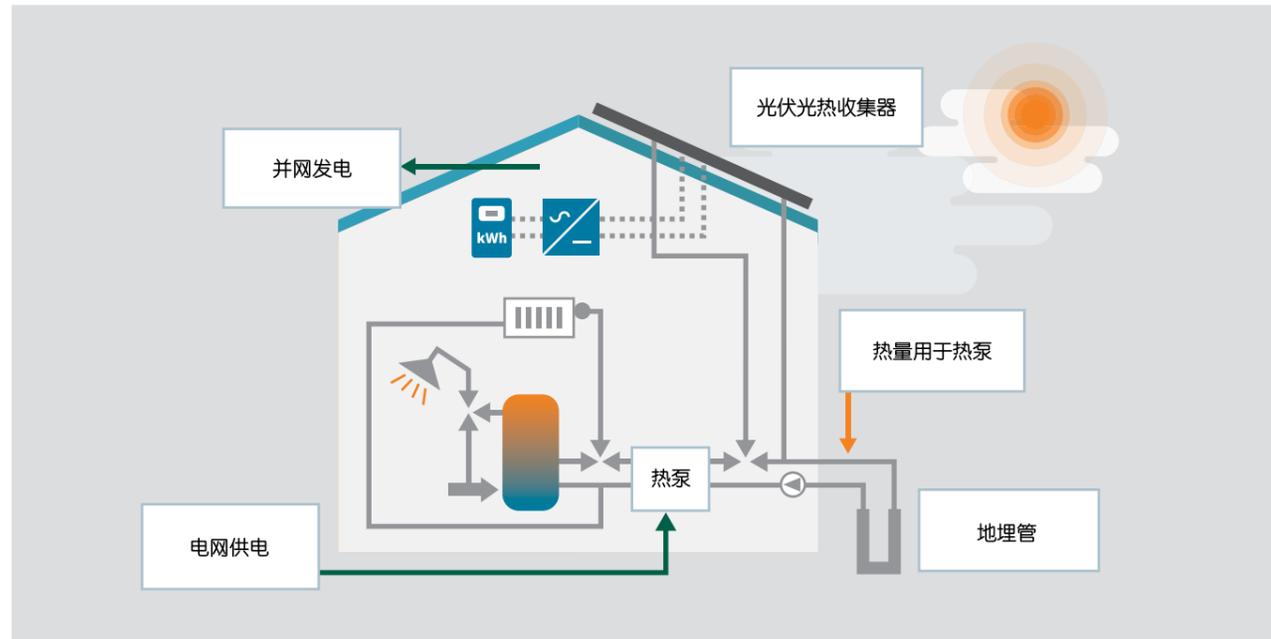
德国的经济学和商业案例

根据供热系统的门户网站，光伏光热收集器每块板的价格（含安装）从600欧元到1200欧元不等[17]。因为技术的普及度还不是非常高，所以难以获得可靠的市场数据。一份关于光伏光热-热泵组合项目的出版物以一个用热需求大约10兆瓦时的新建独户住宅为例，比较了光伏光热-热泵及蓄热集成系统与一个由空气源热泵、光伏模块和蓄热构成系统。其结果表明在每年20,000平方米进行批量生产的情况下，光伏光热系统的投资成本要高出7.5%[13]。

集成系统与单独热泵系统享受同样的支持计划和监管文件（参见章节4.2和4.3）。

² 根据目前电力结构假设平均排放系数为 570g/kWh_{el}

图23：将光伏的过量热储存到地热埋管中



获得联邦环境部资助的一个项目，对配备光伏光热收集器、热泵和地热埋管的新系统进行了调查。通过这种组合，裸露在外的光伏模块得以冷却，当温度从60°C降到40°C，其电效率提高了10%，收集器收集的过量热通过地热埋管消散及储存。针对热泵，热源温度提升10K会使热泵运行系数提高大约1.5。

因此，系统的优势在于光伏区的更高产量以及热泵区的节能。基于这一创新的能源理念，在德莱艾希（Dreieich）的一个试验工厂实现了以太阳能来满足自身的能源要求。在针对更大型住宅建筑而设计的系统中，下面案例比较了带冷却和不带冷却区域的性能。

这是一个居住面积280平方米的独户住宅，通过辐射供热，配备了表面积39平方米的光伏光热收集器，有两个不带冷却的光伏参考模块（3.2平方米），还有一个与三个75米地热埋管相连接的12千瓦热泵。基于两年的运行测量数据，热泵在年性能系数4.2的情况下，可实现非常好的绩效。收集器产生的热量大约为450千瓦时。随着夏季太阳余热的丰富，PVT集热器对热源进行了再生利用。组和系统的光伏产量提高了4%，在特殊的安装条件下或者在其他气候条件，最高可能提高10%。使用热泵实现了10%的电力节省。来源 [18]

试验工厂发电并为室内游泳池供热：这一光伏光热试验工厂位于巴伐利亚州（Bavaria）的屈默斯布鲁克（Kümmersbruck），工厂内来自于光伏模块的过量热

被用于加热室内游泳池的空气。系统的开发者是安贝格-魏登应用技术大学（Amberg-Weiden University of Applied Sciences）和Grammer Solar公司，它得到了巴伐利亚州经济事务、基础设施、交通和技术部的支持。光伏模块面积为130平方米，峰值发电量为16千瓦。使用气流，从尾部对光伏模块进行冷却。峰值的过量热大约为50千瓦，减少了室内游泳池的通风热量需求。光伏能源产量比无冷却的光伏系统高出5%以上。系统的设计是发电优先，以最适宜光伏发电的条件运行，而不是在最适宜太阳能发热的条件下运行。此种混合收集器可以在降低的温度水平下提供大量空气。如果是为烘干设备及游泳池等客户提供全年服务，或者是用于为工艺用热装置进行空气预热，它的效果最好。来源：[18]

³ 容量在100千瓦-热以上的热泵被归为大型热泵。应用包括大型非住宅建筑、工艺供热和区域供热，容量最高达2.5兆瓦（<https://www.ochsner.com/de-de/ochsner-produkte/waermepumpen-fuer-grosse-leistungen/>或<https://www.viessmann.de/de/gewerbe/waermepumpe/grosswaermepumpen/waermepumpen-bis-2-mw.html>

在中国进行试点安装的意见

光伏光热与热泵相结合的供能系统既提高、稳定了太阳能光热转换的输出温度，同时维持光电转换在较低工作温度下进行，提高了光电转换效率；也使得热泵循环性能系数明显提高，减少了热泵冬季供暖时常出现的运行不稳定和结霜等问题。

该技术可实现对建筑的供暖、供电、供热水、供冷等多项应用，充分利用可再生能源，以较小的运行成本，实现系统综合利用效率最大化，系统可以在不同模式下运行，满足建筑的多重需求。

在中国的试点一是可以考虑在单独住宅中应用，也可以如案例研究中的描述，应用于游泳池；也可以与目前的分布式光伏相结合，比如工业园区、厂房、酒店、办公楼、独栋建筑等有用电用电用冷需求的。

4.5 污水热回收系统

废水热交换器与热泵组合使用，就可以实现废水的热能来供热或制冷，制备生活热水。

对建筑物废水的积极使用可以采用三种不同方式：（1）利用污水处理厂上游下水道中未经处理的废水；（2）直接利用污水处理厂中的废水；和（3）利用污水处理厂下游经过处理的废水。

尽管从技术角度来看，直接在污水处理厂或者在污水处理厂下游提取热量更容易实现，但紧邻污水处理厂的地区往往没有热力用户，因为污水处理厂通常都建在远离居住区的地

方。因此，从经济的角度来看，利用污水处理厂上游废水的热能往往最有前景。

在高温废水高发的区域，废水热回收系统的使用效果最高。因为污水处理厂的处理能力会随着废水温度而下降，所以污水处理厂的流入温度不应该比设计温度低得太多。因此，废水热交换器的允许温差只能限定在有限的范围内。此外，废水温度越高、建筑需要的流入温度越低，系统的效率就越高。因此，建议在冬季供热期最低温度在10°C以上的排污明渠中使用废水热交换器，允许的温差最高可以达到4开尔文。

应用	通过使用热交换器和热泵，在住宅和非住宅建筑内，利用污水系统中的废水进行区域供热或制冷，提供热水供应。
目标群体/客户	临近下水道且高温废水高发的城区大型住宅和非住宅建筑。
优点	<ul style="list-style-type: none"> 利用废水中的热能 已经验证的技术 与其他热源（例如环境空气或河流）相比，热泵的性能更好 在产生大量废水的区域具有经济可行性 减少温室气体排放
挑战	<ul style="list-style-type: none"> 在新建筑中表现最好，因为对所要求的供热温度较低 不适合独栋公寓 污水管网运营商和废水热回收系统运营商必须达成协议
成本	<ul style="list-style-type: none"> 取决于废水量和所供应建筑存量的特征 对于现有建筑，经济可行实例的成本为5.5欧分/千瓦时，对于新建筑，则可能高达15欧分/千瓦时³。
CO ₂ 排放因子	100 - 130 g/kWh 根据目前的德国电力结构（570g/kWhel）

技术描述

热交换器的类型

废水热回收系统在污水管中需采用热泵和专用换热器相结合的方式。出于此目的，可以采用排污明渠热交换器或者旁路热交换器。图24展示了不同类型的热交换器。

图24：排污明渠热交换器（左）和旁路热交换器（右）

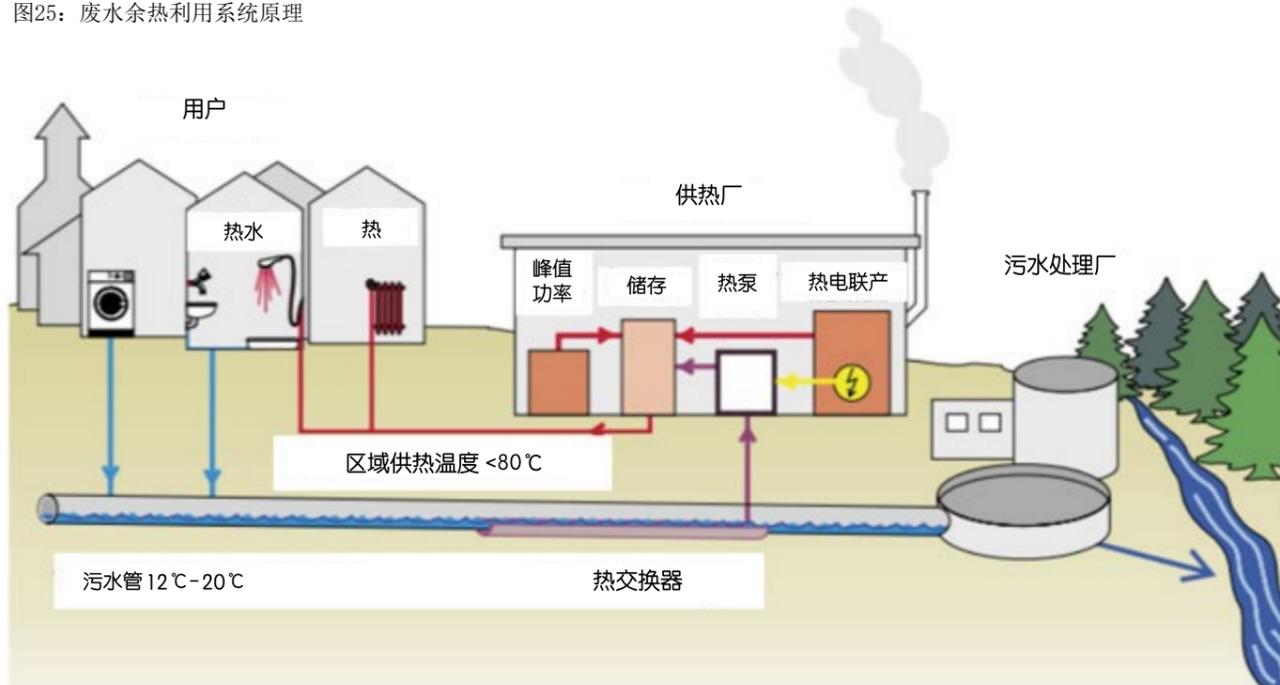


来源：[4] 和 [5]

排污明渠热交换器是根据现有污水情况，采用预制构件的形式制造的，之后可以改造，用于DN 400标称直径或更大直径的下水道中。对于新的下水道构造，可以使用工厂集成的带热交换器的元件，藉此利用成本协同效应。热交换器表面采用具有高导热性的材料，通常采用双层结构，以便中介质流动。热交换器的长度可以轻易地达到200到300米[6]。

旁路热交换器提取一部分废水流量，通过板式或双槽热交换器传输热量。因此，设备安装在下水道以外。与排污明渠热交换器相比，其优点是不需要对下水道本身进行任何不必要的干预，可以不考虑下水道尺寸和几何结构而独立安装。但是，因为初期投资高，所以它们只适用于更大型的系統[5]。

图25：废水余热利用系统原理



来源：[18]，ifeu翻译

容量和供热量

热交换器的传热容量取决于热交换器的表面、热交换器介质与废水的温差以及传热系数k。通常来说，传热系数在0.6到0.9kW/m²K之间变化（DBU 2005）。因此，在3到4开尔文的可行温差下，从废水中提取的热输出量在每平方米2千瓦到4千瓦之间（出处同上）。

已实现的项目表明德国供热的装机容量范围在12千瓦到2,100千瓦之间（平均值160千瓦），制冷的装机容量范围在136千瓦到1,000千瓦之间，平均值为383千瓦[8]。

应用

为了实现建筑内废水能源的可用性，可以通过建筑内的中央供热系统直接集成，或者通过寒区或暖区地方供热网进行集成。很多情况下，都是与下水道紧邻区域的大型建筑或区域

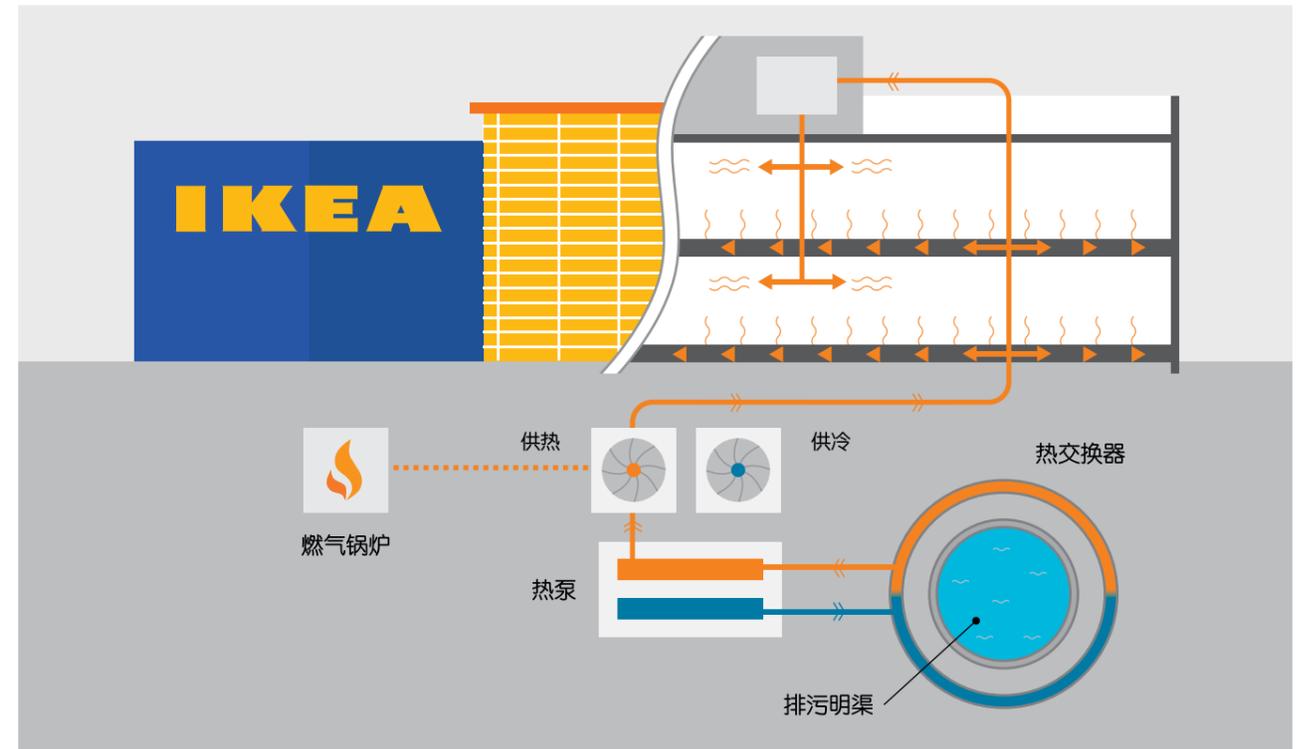
内的废水能源被加以利用。因为投资成本的原因，独栋别墅通常不具有可行性。

通过使用热泵，温度可以达到足以建筑供热制冷以及制备生活热水的水平，但温度还达不到工艺用热的水平。归功于热泵在较低流入温度下的更高效率以及规模经济的原因，在人口密集的节能建筑尤其适合使用废水回收系统。

与其他技术的重要组合

因为废水的温度不足以直接在建筑内使用，因此必须与热泵或其他技术相结合。德国大多数已实现的项目至少都使用热泵作为第二热源，以保证更高的年性能系数。因此，废水热回收系统和热泵通常与热电联产（CHP）或其他峰值负荷技术配合使用。

图26：汉堡（Hamburg）利希滕贝格（Lichtenberg）宜家（IKEA）的供热和制冷理念



宜家——汉堡利希滕贝格

宜家家具店实现了一种利用废水中能量的系统。因为它们在汉堡利希滕贝格新开了一家门店（43,000平方米），临近污水压力管。在规划阶段，要求不能对废水流产生任

何液压影响，因此使用旁路热交换器将废水冷却了2开尔文。安装了三个热泵和一个额外的燃气锅炉，以应对峰值负荷。通过此种设计，可利用废水的能量在冬季供热，在夏季制冷[9]。

来源：基于 [9]

减少空气污染和温室气体排放

在下水道中使用废水热回收系统不会产生任何温室气体排放或污染物。因此，系统对本地减排有巨大贡献。

为了热泵的运行，需要利用电力来驱动热泵达到必要的温度，以实现建筑的供热或制冷目的。热泵的效率的高或低也取决于所需的温度水平。各种研究表明，实现4.5左右的年性能系数是比较现实的（[2]，[10]，[11]）。因此，减少空气污染和温室气体排放的潜力很大程度上取决于用于热泵的电力结构以及被取代的能量载体。

针对德国的分析表明假设发电产生的二氧化碳排放量达到489克/千瓦时，采用热泵和燃气锅炉双热源系统，其温室气体减排比例会在26%到89%之间变动，取决于建筑类型及可用的废水[12]⁴。

图27：布雷滕（Bretten）的排污明渠热交换器



布雷滕/巴登-符腾堡——布雷滕/巴登-符腾堡在2009年实现了一个通过热泵利用废水能量的地方供热网络，为多栋住宅建筑、一个体育馆和一所文法学校供热。所有建筑的总用热需求达到1.8吉瓦时。热泵的供热覆盖比例为25%（Butz和Müller 2010）。供热期内，废水的平均温度为11.6°C。年温室气体减排率达到24%（129吨/年）。项目的总投资为92万欧元，其中三分之一用于制热。2010年的年度热价（不计补助）为7.49欧分/千瓦时。

来源：[2]

图28：内卡公园的排污明渠热交换器



斯图加特内卡公园——在斯图加特内卡公园一个新建的住宅和商业园区内，正在开发22块区域，总计超过450个住宅单位，这些建筑都将使用本地可获取的可再生能源作为供能来源。除了其他方面，废水热能可回馈地方供热网络[10]。此地区位于一个标称直径DN2100、干燥天气排污量达200升/秒的排污主管的正上方，因此，利用废水能源是一个理所当然的选择。设计理念是安装一个热提取容量2.1兆瓦的热交换器。

来源：[15]

⁴ 假设热泵的性能系数为 4.5；对多住户住宅和办公楼进行的分析；假定污水流量为15 l/s和100 l/s；温差4K

德国的成本、经济和商业案例

因为不同区域有不同的框架条件，所以关于使用废水能源进行空间供热和生活热水供应的经济可行性综述可能只适用于有限的范围。对具体工程的明确评估务必要考虑此工程的具体环境。经济可行性取决于地方区域供热网的经济可行性，因此：

- 用热需求密度越高，地方供热网络的安装成本就越低[1]。
- 用热需求密度越高，网络损失就越低[13]。
- 流动温度越低、地方供热网络越小，热泵的运行成本就越低，网络损失也越小[14]。

此外，成本明确依赖于电价，包括所有税捐，经济可行性也取决于竞争技术的成本。

在德国实现的项目表明可能的成本范围如下：

根据一个热交换器制造商的报告，在适当地点实施项目的成本为7.2欧分/千瓦时[19]，包括安装成本、排污明渠热交换器、热泵以及运行成本。在德国巴登-符腾堡执行的一项可行性研究表明，热产生成本会随着可用废水流量的变化而变化，其波动范围为200升/秒流量下的5.5欧分/千瓦时到20升/秒流量下的8欧分/千瓦时[18]。还针对斯图加特（Stuttgart）内卡公园（NeckarPark）的低能耗住宅区，列出了各种方案的热产生成本，其中废水热能热电联产的组

合是最实惠的方案（15欧分/千瓦时），其成本低于单独运行热泵（18.7欧分/千瓦时）、燃气冷凝锅炉（16.1欧分/千瓦时）和大型热电联产（15.1欧分/千瓦时）（[10]）。

在高废水量地区（例如主排污明渠旁边），利用废水能源已经具有经济可行性。一个主要的问题是对此种城市废热能源潜力的认知还尚未普及。缺少全国性的下水道网络映射信息，无法从网上获取相应的污水量。这就意味着正常经营废水热回收系统的私人建筑商及能源服务提供者往往缺少规划依据。此外，此项技术的投资成本高，形成了初始障碍。

这种系统的一个很好的切入点可以是对新的排水系统或污水系统的改造进行综合规划，以便从一开始就将这种热交换器集成到区域供暖系统中。

目前，公共污水系统，特别是对有热泵和热交换器进行热量生产和热回收系统的安装，可通过以下两项资助计划获得支持：

- 活力城市开发[16]。为城区市政供热、制冷、供水和污水系统能效进行可持续投资提供投资信贷，热交换器和热泵的安装也可以从中获得资助。
- 市场激励计划MAP可以为热泵提供资助。取决于热泵的规模，资助金额总计为100欧元/千瓦（热泵<100千瓦）或者最高50,000欧元（热泵>100千瓦）。

在中国进行试点安装的意见

城市污水全年温度稳定，通常在10-20°C之间，受气候影响较小，流量较大，是城市区域主要的可利用的低位热源。污水源热泵系统可以将热量从污水中提出，用于较小区域内建筑或区域供热和制冷。污水源热泵相比地源热泵，初投资较少，比空气源热泵运行更加稳定，一般情况下，污水源热泵系统的COP在3.5-4.5。

一开始可以在很多城市和大型村庄安装试验设备，最好是在临近大型废水收集管道的地方。可以作为城镇区域性的补充热源，主要解决污水资源周边区域小范围的采暖供热，可用于办公楼、商场、民用建筑等供暖和制冷，提供暖通空调及生活热水等。在中国新建的开发区整体规划设计阶段最好能够考虑一体化的污水解决方案，比如采用排污明渠热交换器回收利用污水余热。

污水源热泵系统可以利用二级污水或者原生污水，污水处理厂排放的二级污水的水质接近清水，但是污水处理厂大多处于郊区，远离城市。因此，城市区域遍布的原生污水更具有开发潜力。

采用旁路换热器时，污水中的杂质容易导致污水源热泵系统中的管道和换热设备堵塞，换热器表面经常出现结垢，导致热泵系统难以维持正常运行，这些问题是中国污水源热泵系统推广使用的主要瓶颈。在推广使用过程中，要提高防堵、防垢、防腐技术水平，采取适当的预处理措施。而采用排污明渠热交换器则可以避免类似这样的问题，但是需要掌握已建成排污系统下水道网络信息并加以改造，在污水系统或排水系统初始规划建设或进行改造时，适合将这一技术集成到区域供暖系统中。

4.6 生物质能村庄/社区

生物质能村庄背后的想法是使用当地生产的生物质能，满足其自身至少50%的热能和电力需求。生物质能电站（生物质锅炉或生物质热电联产）至少部分归用热居民或本地农民所有。可持续提供的生物质来源于周围环境，提高了本地的附加价值。此外，还定期检查并落实能效和节能措施。可使用其他可再生能源，例如大型太阳能集热器，作为生物质热源的补充（参见章节4.7）。

历史与市场发展

生物质能村庄最开始的定义是基于生物质能村项目 (Ruppert, et al., 2008), 其中生物质能村是根据以下标准定义的:

- 由生物质产生的电量至少等于该地方消耗的电量
- 村庄至少一半的热需求由生物质覆盖。为了实现高效能，应采取热电联产
- 村民参与了生物质能村的规划和决策过程。生物质能电站的50%以上份额属于供应生物质的消费者和农户。

另一方面，可再生资源局 (Fachagentur Nachhaltige Rohstoffe e.v. FNR) 对生物质能村庄的概念并没有给予那么严格的定义，而是对其进行了更宽泛的解释：

- 生物质能村当地生产的生物质能至少可以满足该地区电力和热需求的50%。
- 公民参与决策过程，并积极支持生物能源村的构想。生物能源设施至少部分地属于热力消费者或当地的农民，而可持续提供的生物质来自附近区域。
- 生物质产生的热和电可以通过使用其他可再生能源来补充。

德国最早在2005年引进了生物质社区的理念。截至2018年，已建成151个社区，还有43个尚在开发[2]。尽管此理念最初是在2005年引入德国，但一些生物能设备在2005年之前就已经投入试运行。在德国，约有65%的生物能社区是在2005到2011年之间建成的。

生物能社区的建造与《可再生能源法案》(EEG) 及其修正案密切相关。该法案支持以生物质或沼气生产的能源，同时立法也促进了生物质能村的建立，但随后几年的若干修订降低了支持力度。然而，尽管立法支持力度下降，但是，生物质能村庄的建设在未来几年依然充满了可能性。

应用	使用本地产生的农业废弃物制热，其目标是满足本地至少50%的区域供热和热水需求。
目标群体/客户	农业地区和农村
优点	<ul style="list-style-type: none"> • 减少温室气体排放 • 已经验证的技术 • 通过提高生活质量、地方认同和乡村社区实现农村地区的结构性变化和发展 • 降低对化石燃料供应商的进口依赖
挑战	<ul style="list-style-type: none"> • 粮食作物和能源作物耕作土地的竞争加剧 • 对个体农民的依赖性增加 • 单一作物的土壤密集耕作可能造成环境问题
成本	生物质发热设备的平准化供热成本在8欧分/千瓦时到11欧分/千瓦时之间。几乎有一半（或者49%）的成本为可变运维成本（燃料、辅助能、除灰及其他运行物料的成本），在剩余的一半中，13%为固定运维成本（人员、排放测量、维护合同的成本），37%为投资相关成本[1]。

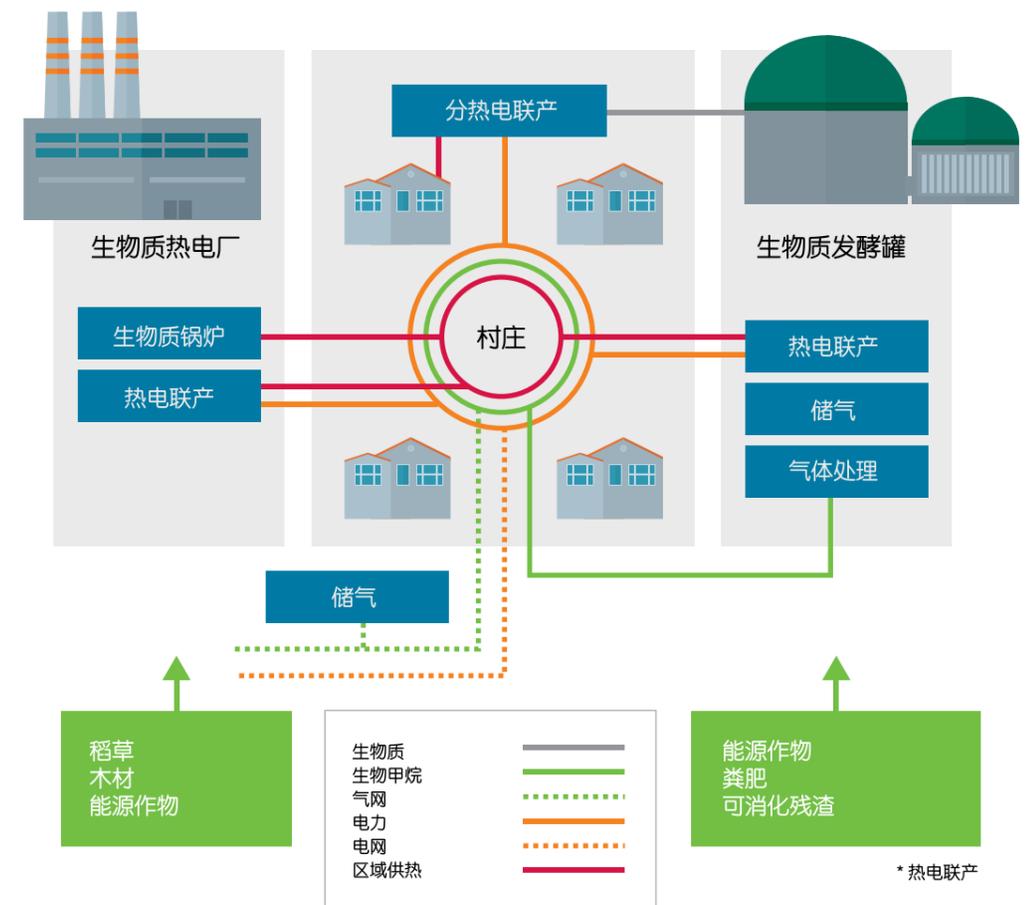
技术介绍

图29显示了生物质能村/社区中的物料流。除了产生热量外，这些社区还可以利用当地农业残余物产生的能量来生产电力和沼气。

生物能源村的基石是当地的供热网络。当地的供热网络利用了短管路线，很少的交叉和通过社区独立运营发挥了协同作用。

用。这为管道网络中的低热量损失提供了良好的条件。社区将自己的能源供应掌握在自己手中，这使得热站得到了高度的认同，以及保证了其经济运营中的自身利益。此外，当地的供热网络提高了生物质锅炉的经济可行性，并使其他可再生热源（例如大规模的太阳能热源）得以互联。在某些情况下，如有利的经济条件下，可用沼气网络代替局部供热网络，该沼气网络将沼气厂与分散式燃气锅炉或微型CHP装置连接起来。

图29：生物能村庄的物料流

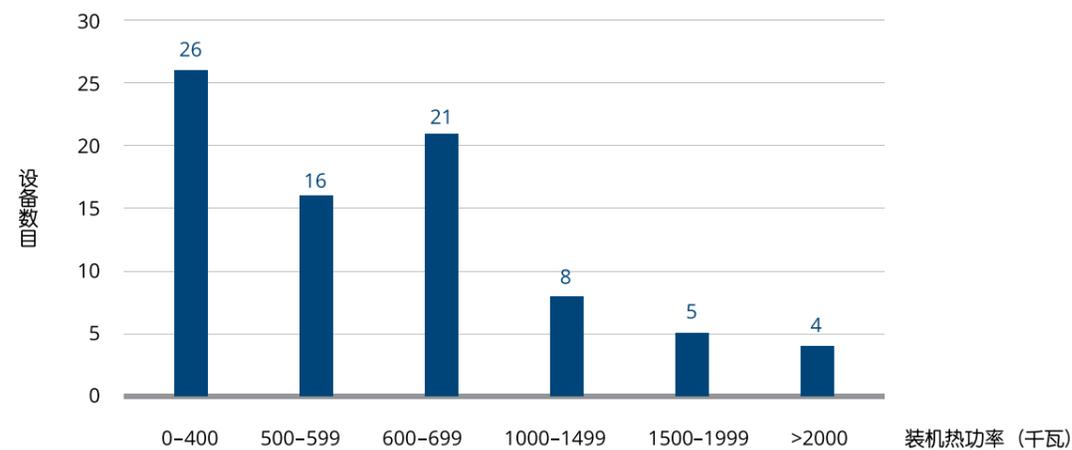


来源：FNR 2019 [6]

容量和产量

生物质能社区的典型产热容量低于4000千瓦_热。图30展现了80个生物能社区的装机容量。生物质锅炉的能效在75%到85%之间。

图30: 木屑锅炉在80个生物质能村装的装机容量 (kW)



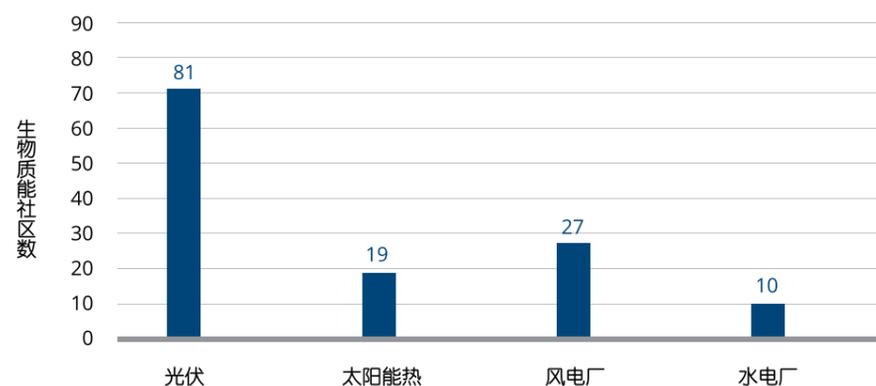
来源: ibeg 2017 [5]

应用

生物质能村庄的应用规模下至50户的小社区, 上至超过500户的大社区。此外, 生物质村庄/社区的应用并不局限于产热, 也可用于发电和生成生物气。在德国逾137个案例中, 还与太

阳热能、光伏、风电和水电设备等其他可再生能源技术组合使用。图 31展示了生物质能社区内生物质锅炉与其他可再生能源技术的组合情况。

图31: 生物质能社区的生物质设备与其他可再生能源技术的组合情况

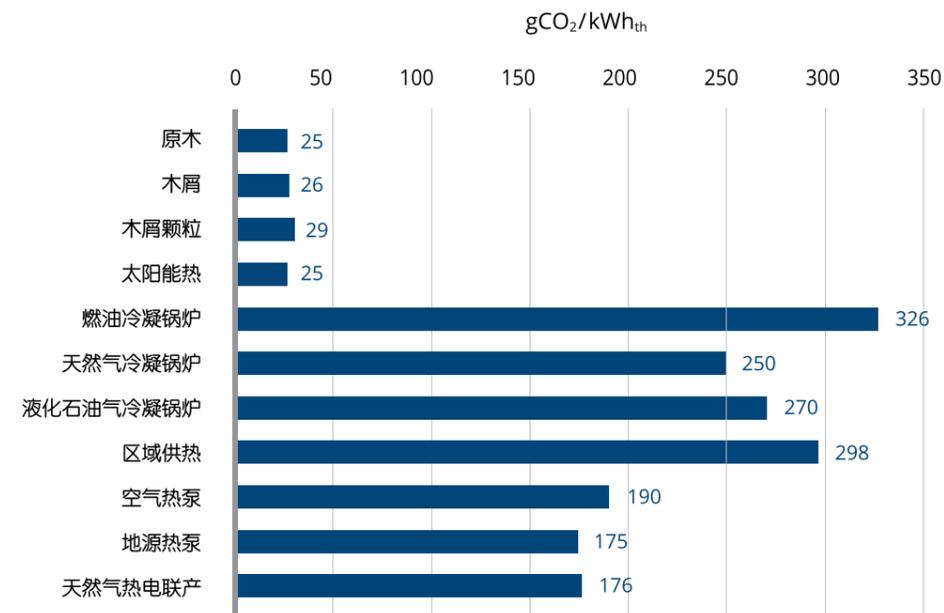


减少空气污染和温室气体排放

燃烧生物质会向大气中释放二氧化碳 (CO₂)。但是, 作为生物质能源的作物在生长过程中, 可通过光合作用捕获二氧化碳, 其数量等同于生物质燃烧时所释放的二氧化碳, 这能使

生物质成为碳中和能源。此外, 人们也开始担心生物质锅炉的颗粒物及氮氧化物排放问题, 尤其是当操作此类锅炉的用户经验不足或者未接受过培训时 (参见章节4.1)。图32展示了不同供热技术每产生一千瓦时热量所排放的二氧化碳当量。

图32: 不同供热技术的具体温室气体排放



来源: FNR, 2018斯图加特大学能源经济与合理利用研究所 (IER Universität Stuttgart) 2016 (基于全球集成系统排放模型 (GEMIS) 版本4.94) [6]

德国的经济学和商业案例

投资成本可能因以下因素而发生变化: 生物质设备的类型、地方供热网络的长度、生物质能社区使用的其他可再生能源技术的类型以及蓄热设备的规模和类型。这些都影响了生物

质燃烧锅炉的比投资。综上所述, 生物质能村庄的总投资取决于本地条件及其他已实施的技术。

图33: 布辛根生物质能村



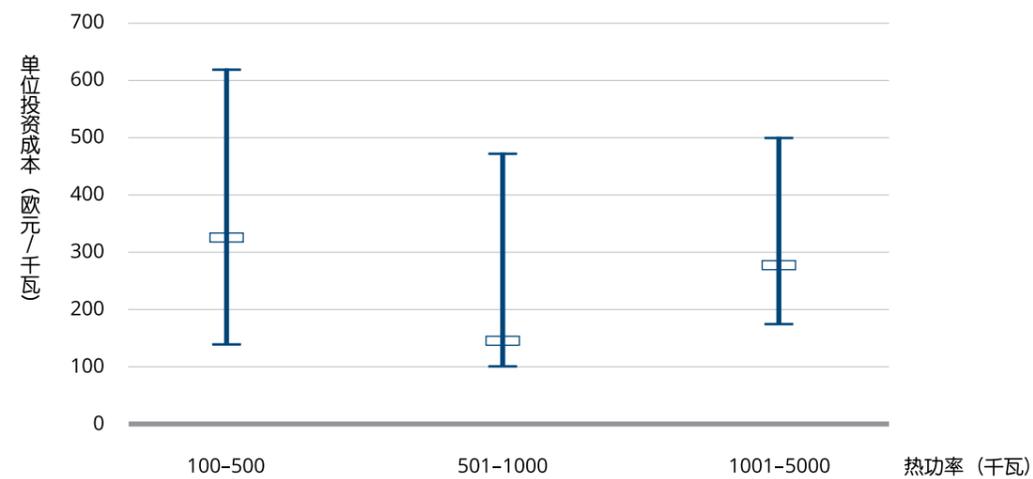
生物质能村庄的一个创新范例位于上莱茵地区布辛根 (Büdingen)。该村庄以两个木屑锅炉 (900千瓦+450千瓦)、燃油锅炉 (750千瓦) 和缓冲贮料区 (100立方米) 为地方供热网络 (长约5千米) 和100个换热站。其特色是架设了一个集热面积约为1,000平方米的太阳能集热器, 而没有使用惯常的沼气厂。规划中的生物能村庄的创新之处在于将太阳能发热集成到一个大型的可再生能源地方供热网络中。到目前为止, 此种理念尚未在巴登-符腾堡及德国实现, 因为热电联产厂可以得到《可再生能源法案》(热电联产奖金) 的交叉补助, 其发热成本要低得多。据悉, 类似的项目只存在于丹麦和奥地利。项目的总投资为350万欧元。

图34：兰德格区生物质能村



另一个实例位于戈特马丁根 (Gottmadingen) 的兰德格区 (Randegg), Randegger Ottilien-Quelle 公司的一个大型木质颗粒锅炉 (700千瓦) 已经投入运行。它有相当大的灵活性调节潜力,因为它只在大型洗瓶车间进行生产时运行。由于这一流程主要发生在夏季和白天,且附近的居民区有供热需求,所以这个工厂得以全年更充分地利用。除了长度约4千米的大型地方供热网络以外,还将安装一个燃烧容量大约1兆瓦的木屑锅炉,用于基础负荷。现有的颗粒锅炉集成到总体系统中,作为应急及峰值负荷锅炉。此外,自2018年7月起,方案还得以拓展,在集中供热系统附近打造了一个大约2400平方米的太阳能集热站。集热站将满足大约20%的年供热要求。这也促成了系统效率的进一步提升。总的来说,项目每年大约可以减排1000吨二氧化碳。

图35：完全装配、自动填料的燃烧生物质锅炉的单位投资，包括除灰、空气和烟气系统以及烟气清洁



来源: FNR (2014)

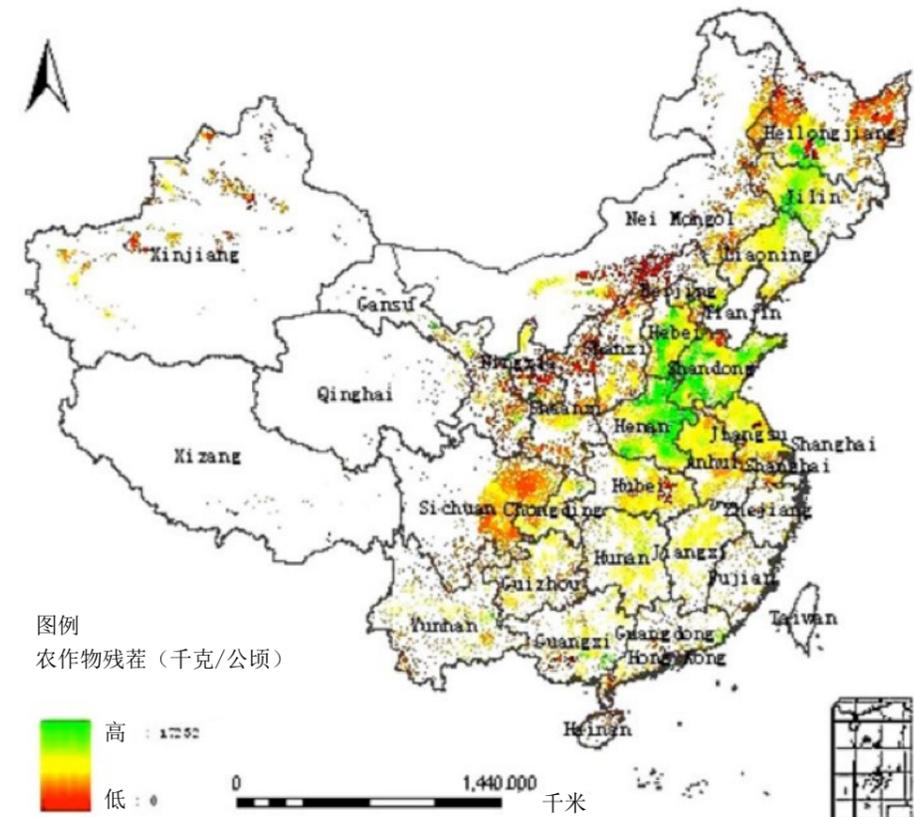
在中国进行试点安装的意见

尽管在中国农村地区生活的人口比例呈不断下降之势 (从2008年53%的人口下降到2018年40%的人口 [3]), 但生物质能社区的潜力依然巨大, 尚未充分开发。2000到2009年, 中国生物质潜力的平均值估计大约为7亿吨, 生物能潜力为7.4艾焦耳/年 (Jiang等人 2012) 或者2018年总能源需求132艾焦耳的6%左右 ([7])。尽管作物残茬的年度波动非常小, 大约为1.2%, 但其空间分布非常不平衡。最适合打造生物质社区的行政区在河南、山东、河北和吉林地区 (图 36)。

生物质锅炉供热初投资成本低于燃煤锅炉, 与燃气锅炉相当, 目前生物质成型燃料中国市场价格约900元/吨、热值16-19MJ/kg, 运行成本要高于燃煤成本、低于燃气成本。目前, 在东北地区气候寒冷, 居民住宅/非居民住宅取暖费较高, 生物质锅炉为居民住宅/非居民住宅供热项目具有一定的可行性。而在其他居民取暖费较低的地区, 仍需政府给予一定财政扶持。生物质能村的概念和模式有利于生物质资源就地消纳, 减少中间流通环节, 降低燃料成本。

生物质能村试点过程中宜选取刚建设的新村或社区, 与中国政府推动的“新农村建设”“美丽乡村”等工程相结合, 系统规划整村/整个社区的供热热源、热网, 同时注重房屋的节能。生物质能村业主可以以村委集体为主, 采取PPP等不同运作模式, 建立生物质的收集、加工、储存等环节。也可以考虑与农村太阳能利用相结合, 充分利用农村/社区丰富的空间资源, 形成多能互补, 保障热力和电力需求。在推广过程中, 要注重生物质燃烧的颗粒物、氮氧化物的控制, 满足当地环保要求。

图36：2009年中国净农作物残茬的空间分布 (100×100米) (Jiang等人 2012)



来源: Jiang et. Al 2012 [7]

4.7 大型太阳能集热站

技术描述

太阳能集热器是将太阳辐射转换成热能的装置。吸收器中生成的热量通过液体（通常是含有防冻剂的水）转移到需要用热的地方。集热器有两种主要类型：平板集热器（FPC）和真空管集热器（ETC）。在平板集热器中，可在前侧安装透明盖（大多为玻璃材质）、后侧涂有绝缘层，以防止吸收器的热量流失到周围空气中。在真空管集热器中，吸收器置于真空玻璃管内，可以非常有效地防止热量流失。除了热量流失以外，集热器的效率还取决于集热器的光学性质。平板集热器在这一方面更有优势。因此，具有更好隔热的真空管集热器只有在更高温度下，才能提供更高的供热量。

面积超过数百平方米的大型集热站，最早建成于丹麦，其中

应用	产生中低温度的热量，汇入区域供热和工业用热：常应用于周边是农村的小城市，但越来越多地应用于现有的大型区域供热系统。常与大型季节性蓄热设备配合使用。
目标群体/客户	公用事业及区域供热运营商、工艺用热大客户
优点	<ul style="list-style-type: none"> 化石燃料到可再生能源区域供热的经济转型 高可扩展性 无需燃料
挑战	<ul style="list-style-type: none"> 必须有很大的面积才能安装集热器。 随着太阳能占比的不断提高，需要季节性蓄热设备。
成本	取决于投资成本。在德国的太阳能条件和建设成本下，热成本大约为3.5欧分/千瓦时 _热 。
CO ₂ 排放因子	15-35克/千瓦时

应用

使用太阳能集热器为生活用水、空间供热、区域供热或者工艺用热生成热量（真空管集热器最高可达150℃左右）。几乎所有的较大设施都是与区域供热配合安装。很多情况下，此类区域供热网络都位于农村地区，因为农村有足够的空间建集热站。在德国，集热器通常与新区域供热系统一起安装。

过去几年间，在较大城市附近也开始安装大型集热站。大型集热站不必安装在离用户非常近的地区。根据经验来看，只有集热站与定居地之间的距离小于定居地直径的两倍，那么热传输线路上的热损失就是可以接受的。

最大的一个位于锡尔克堡（Silkeborg），面积达到156,000平方米。此项技术在德国的应用也越来越多，多个制造商和服务提供者都专注于此项技术。

用于区域供热的大型太阳能集热站的典型供热量在500千瓦时/（平方米×年）。考虑到集热器表面每年的太阳辐射量大约为1,250千瓦时/（平方米×年），此供热量对应的年度平均效率约为40%。

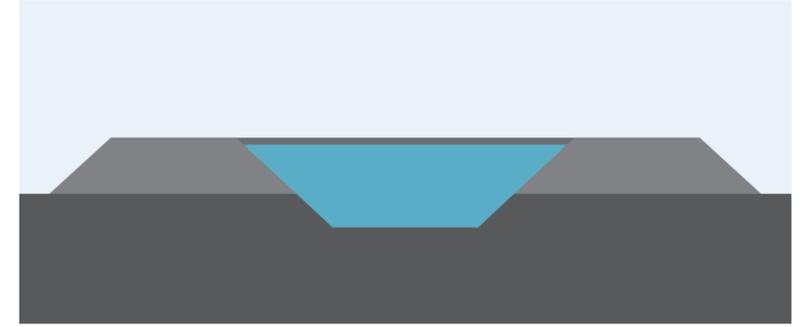
使用中等规模蓄热设备的太阳能区域供热系统，其典型的太阳能保证率在20%左右（剩下80%的用热需求由其他热源提供）。通过使用大型蓄热器，此数值可能提高。当太阳能保证率低于10%以下时，只需要少量蓄热或者根本不需要蓄热。供热量会随着温度需求的上升的下降。

季节性蓄热

在冬季，需要更多的空间供热，但太阳能集热器不能稳定输出热量。因此，只有使用了蓄热设备，才有可能实现更高太阳能供热占比。太阳能供热占比要高于30%，就需要使用季节性蓄热设备。有些较大系统可以实现40%左右的太阳能供热占比，比如一个面积37,600平方米的集热站与水容量63,000立方米的季节性蓄热设备配合使用。此太阳能项目的总投资成本为1413万欧元，其中只有六分之一是用于季节性蓄热设备。

实现季节性蓄热的技术理念多种多样，其中包括罐蓄热、坑蓄热、钻孔蓄热以及蓄水层蓄热。最佳的蓄热概念取决于当地（例如地质）和技术条件。到目前为止，最便宜的解决方案就是带浮动盖的坑蓄热。与其他理念相比，它有两个劣势：首先，车辆或者其他重负荷无法从顶部进入蓄热设施；其次，蓄热设施的底部和围壁没有任何隔热。但是，测量出的蓄热设施年热量损失大约为其储存热量的10%。

图 37：砾坑季节性蓄热的原理



季节性蓄热设施不仅可以提高太阳能供热占比，还可以为“领域耦合”铺平道路。这一点变得越来越重要，就如同德国德国的电力情况一样，来自光伏和风力发电等高波动性电力占比越来越大。如果电网中有充足的，来自可再生能源的电量，那么它可以为季节性蓄热设备进行加热。到目前为止，水蓄热的成本还是低于电池蓄电。可以使用简单的电热器或者更高效地热泵，直接加热水。

客观地看，还可以将季节性蓄热设备用作蓄电。过量电力可配合热泵使用，提高季节性蓄热设备上限的温度（例如提高到150℃）。

减少空气污染和温室气体排放

太阳能集热器不会排放温室气体或者释放其他污染物。从寿命期评估的角度来看，建设太阳能集热站的温室气体排放量非常低。在运行期间，需要电力来驱动控制器和泵。但是，与所获得的太阳能热量相比，所需的电力微不足道。

制造集热器会造成一定的污染。但是，与其他热生成方案相比，此技术可能避免的污染量还是高于制造集热器产生的污染。在大约一年半以后，集热器所节省的能量就等同于生产集热器所需的能量。

在小型区域供热系统中，锅炉在夏季只用于生产热水（或制

冷），而使用太阳能集热器，就便于在夏季关停锅炉。在冬季，太阳能集热器产生的热量（配有季节性蓄热）将取代锅炉的大量热生产。热泵可与蓄热装置相连接，以提高可以从蓄热设备中提取的太阳热能的比例。到底减少哪些排放物取决于集中供热系统中太阳能所取代的能量载体和技术。它可能是煤炭、天然气、石油或者生物质。

历史与市场发展

在德国，人们对大型集热站和季节性集热设备的关注度越来越高。本世纪初，就已经实现了很多研究设施的安装。因为在丹麦的爆发式发展，过去几年间，人们对大型太阳能设施的兴趣也提高了。此项技术最初应用于村庄，用于打造基于生物能的区域供热系统。在这些地方，太阳能的使用节约了稀缺的生物质资源。目前，有不少在建的新设施，其目的就是为城市现有的区域供热系统提供太阳热能。这里的认知就是区域供热必须变得更加生态友好。

2020年，德国预计将安装大约100000平方米，或者超过40套系统，未来几年，会呈现出急剧上升的趋势。最初的系统一般都是由小型区域供热运营商发起的，但进入此市场的公用事业机构的规模越来越大，比如“生物能村庄”和能源合作社。驱动此项技术发展的是德国有意在2038年之前淘汰燃煤电厂的规划。今天，德国区域供热中，燃煤发电的占比很大。燃煤热源将逐步淘汰，因此必须找到该热源的替代者为供热系统供热。

图38：布辛根（Büdingen）集热站的真空管集热器



2012年，布辛根——一个有1300个居民的村庄——安装了第一套商用集热站（与研究用设施不同），为区域供热网络供热。通过面积大约为1,000平方米的真空管集热器和一个蓄热罐（100立方米），可利用太阳能满足区域12%的用热需求。剩余部分由两个木屑锅炉提供。私有建筑和公共建筑中的107个燃油锅炉已被可再生能源区域供热系统所取代。

来源：ifeu, M. Nast

图39：截至2019年8月德国已安装的大型太阳能集热站

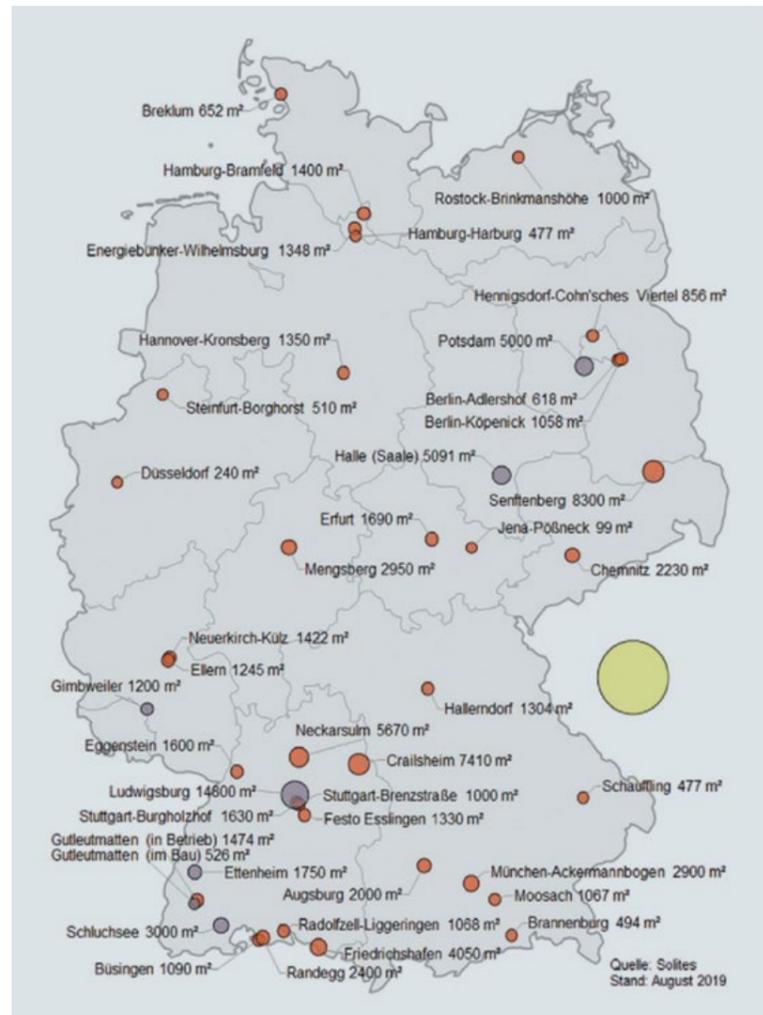


图40：多宁隆德（Dronninglund）附近集热站的平板集热器



德国的经济学和商业案例

完整安装的大型集热站（≥10,000平方米）的投资成本在200欧元/平方米的范围内。年电力成本和维护成本较低。为产生一兆瓦时的热量，驱动集热站的泵只需消耗大约4千瓦时的电力。维护成本与电力成本的范围类似。一般来说，按照初期投资的0.15%计算总运维成本。

来源：[1]

作为范例，下图展示了一个总投资成本1460万欧元的特定系统的成本分布，其中可以获得此种数据。除了集热站本身的投资以外，图中还描述了以下要素的投资：季节性蓄热设备、运行建筑、从集热站到居住中心中央供热系统的热传输线路、生物燃油锅炉和从蓄热设备的低温部分向高温部分抽取热量的热泵。

来源：ifeu, M. Nast

图41：多宁隆德一个具体太阳能集热站的投资成本细分（总成本：1460万欧元）

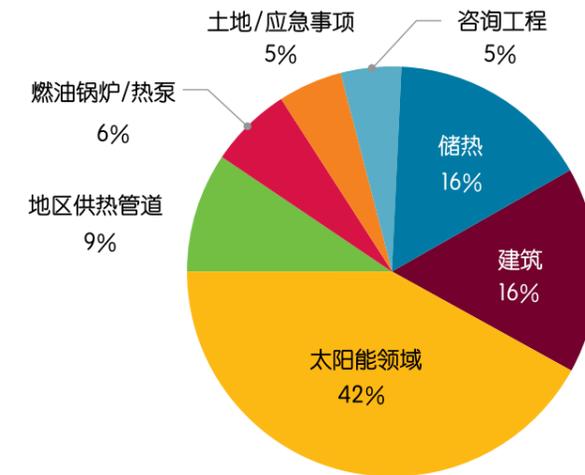


图42：森夫滕贝格附近集热站的真空管集热器



来源：R. Meißner, Ritter XL Solar

自2016年起，德国最大的太阳能热能设施就在森夫滕贝格（24000位居民）运行。通过面积8,300平方米的真空管集热器，利用太阳能满足了区域供热系统4%的年年热需求，取代了原本由褐煤厂生产的同等热量。系统不使用任何蓄热设备。区域供热系统内的温度相当高。集热器必须在全年提供85℃以上的温度。但是，其太阳能产量可达到4千兆瓦时，对应于480千瓦时/（平方米×年）。此设备取代已关停的褐煤热电联产电站（CHP），提供热量。

按6欧分/千瓦时计算相应的热成本（利率4%，按寿命期20年计算）。此类成本中，可分配给集热站的部分是4欧分/千瓦时。考虑到更大型项目（例如在锡尔克堡）的专用性投资更低，实际寿命期更长，可用的经济条件更好，现如今，集热站的发热成本降低到2欧分/千瓦时左右。

到目前为止，德国集热站的规模远小于丹麦。此外，集热器的质量要求更高，因为德国区域供热网络的流体温度相当高。因此，德国集热站的成本大约是丹麦成本的两倍。

德国和丹麦的太阳辐照量差不多。而中国大部分地区的太阳辐照量要高得多——即便是在人口密集的区域。这会导致发热成本的下降。

在路德维希堡（93000位居民），德国面积最大的太阳能集热站，平板集热器面积14800平方米，将在2020年投入运行，取代森夫滕贝格最大太阳能集热站的位置。此集热站每年提供5500兆瓦时的太阳能（相当于370千瓦时/年）。已经开始建造容量2000立方米的蓄热罐。太阳能设施将集成到大型现有区域供热系统中。它主要取代以木屑作为燃料的热电联产厂的发热量。因此，在电价下行的夏季，可以关闭热电联产设备，因为光伏设施的上网电量高。

德国已经建成了34个大型集热站，为区域供热系统供应太阳能，总集热面积62700平方米。预期到2023年，设施数量将翻一番，集热器面积将增值三倍。

与太阳能相竞争的燃料能源，在德国的征税远低于其他国家，这让发展可再生能源作为区域供热的替代能源变得更加困难。作为补偿，德国有各种有利于驱动太阳能供热系统的补助：

- 为区域供热系统供能的集热站，可获得投资成本的40%作为补助。如果所生产的能量主要用作工艺用热，此补助比例可能提高到50%。此外，还有打造可再生能源区域供热系统的推广措施。德国，每一米沟槽长度可以获得60欧元的补助，此外，每完成一户家庭的服务连接，可额外获得1800欧元的补助。区域供热的最高补助限额为100万欧元。在德国，此计划被称为市场激励计划（Marktanzreiz-Programme）。
- 除了市场激励计划，还存在另一种融资可能性：对于完整的区域供热系统，可申请投资成本20%的补助。对于中小企业，补助比例可提高到30%。如果满足了某些严格的条件，可支付20%的额外津贴。因此，总计补助能达到50%。最大补助限额为1500万欧元。在德国，此项计划被称为“热网4.0（Wärmenetze 4.0）”。
- 各联邦州可能支付额外的补助。在巴登-符腾堡州，如果满足某些额外的条件，可以获得区域供热系统建造成本的20%作为额外补助。最大补助限额为40万欧元。在德国，此计划称为“能效热网（VwV energieeffiziente Wärmenetze）”。

- 另一项补贴措施与建设创新型热电联产厂有关。例如，在太阳能集热站与热电联产厂组合的电站中，太阳能集热装置产生的热量至少相当于热电联产设备在3000个小时内生产的热量，则该热电联产被认为是具有创新性。以公开竞标作为推广形式。每产生一千瓦时电力所需溢价最低的热电联产厂可以获得奖金。溢价限额为12欧分/千瓦时-电。热电联产厂最大满负荷运行时间达到4.5万个小时即可支付。溢价总额没有最大限额。此项推广能为大型太阳能集热站创造更具吸引力的融资条件。该计划还可以资助大型热泵，但不能资助由其他计划资助的生物质和地热装置。在德国，此项推广被称为“热电联产招标投标条例（KWK-Ausschreibungsverordnung）”。

一般来说，太阳能设施由公共事业机构经营，而此类机构本身也经营着区域供热系统。有些公司认为：开始“太阳能承包服务”意味着要由独立的运营商规划、安装及经营太阳能系统，为区域供热公司提供太阳能。这会导致一种有趣的尺度效应，因为此类公司可与制造商密切合作，甚至直接将项目交给制造商负责，从而实现更高的购买条件，学习并积累技术知识。

在中国进行试点安装的意见

太阳能热利用技术成熟、应用广泛，用于生活及工业热水、取暖及制冷等的热能供应。中国太阳能辐射资源丰富，太阳能热水适合全国范围内应用。目前太阳能热利用应用领域主要是生活热水的供应，主要包括居民热水应用、宾馆、浴室等集中供热应用，以及太阳能与其他能源结合，实现太阳能热水、供暖复合系统的应用。目前中国太阳能热水器应用重点是小城镇、城乡结合部和广大的农村地区。大规模太阳能集热器集中供热系统的应用重点在中大型城市的学校、浴室、体育馆、酒店等公共设施和大型居住建筑。

从经济方面来看，集热器在满足以下两个气候条件的情况下性能最佳：供热需求高，太阳辐射量高——尤其是在冬季。此外，区域供热系统的存在是安装大型集热场的先决条件。

试点安装的实例位于北京西边几个较大规模的镇子，海拔均超过1000米。这里的辐射量比德国的规定值高出60%左右，气候寒冷（比如，大同镇，居民140万，海拔1200米）。在这些地方进行大型太阳能集热场的试点安装似乎是个不错的选择。

大型太阳能集热场目前在中国其他地区也有一些应用，比如沈阳北软图书馆1.6万平方米太阳能采暖项目、西藏大学2万平方米太阳能采暖项目、淮北矿业局袁店二矿500吨太阳能热水项目、河北经贸大学1.16万平方米真空管集热器太阳能跨季节蓄热供暖工程等。面临的主要问题是工程前期投资成本较大，需要政策给予补贴支持，而目前还缺乏明确可行的支持政策。

4.8 地热区域供热

此案例研究集中关注地热区域供热（GeoDH），利用深层地热作为能源为个人及商业建筑供热，以及通过输配网络，为工

业供热。这与第4.2和4.3节介绍的针对浅层地热的技术有所不同。

应用	区域供热
目标群体/客户	城市；私人热网运营商
优点	<ul style="list-style-type: none"> • 可以提供恒定基础符合的本地及灵活可再生能源。 • 已经验证的技术 • 空间要求相对较小 • 运营成本低 • 减少温室气体排放
挑战	<ul style="list-style-type: none"> • 资本密集型 • 需要有利的地热条件 • 泵的电力消耗
成本	投资成本（德国，单位：欧元）：1亿欧元；发电成本（德国）：2-8欧分/千瓦时
CO ₂ 排放因子	16 - 79g/kWh（取决于抽水所用的电力）

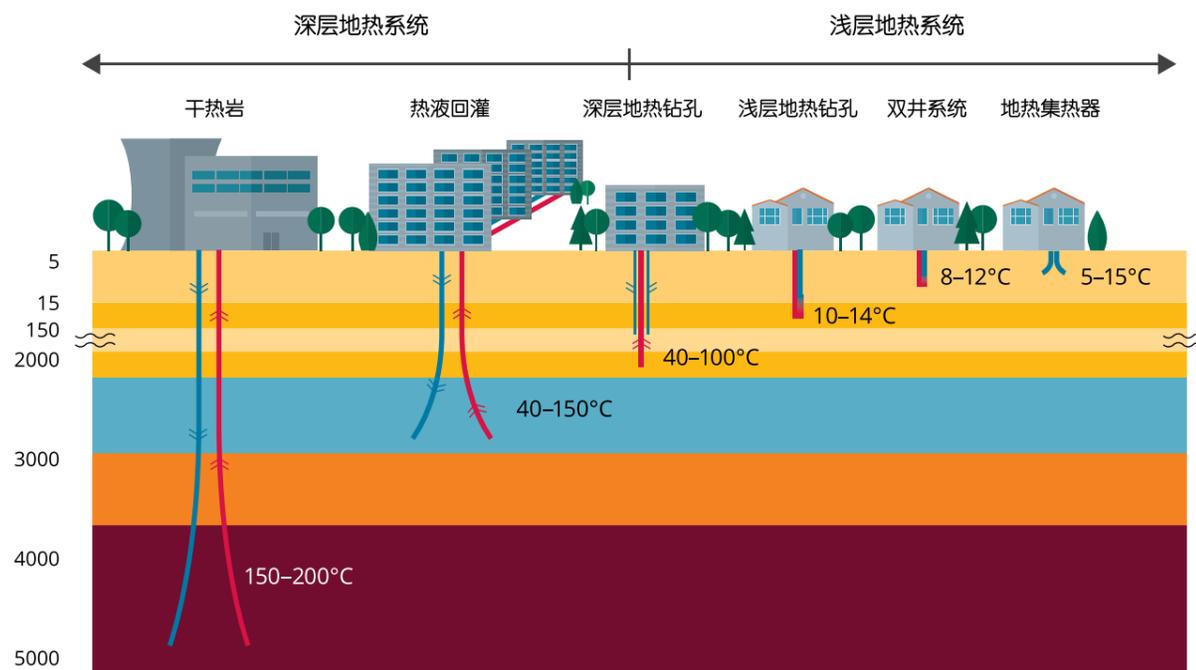


技术描述

地热能使用的类型

基于深度，地热能可以分为两个部分：浅层地热能和深层地热能[13]。最常见的浅层及深层地热使用系统如图43所示。

图43：地热能使用的不同类型 [13]

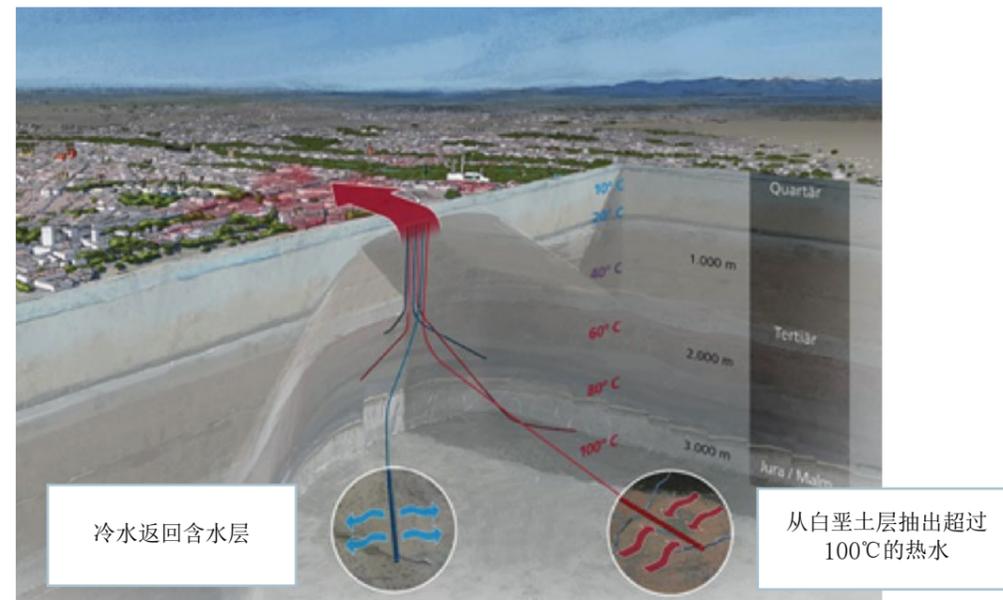


浅层地热能描述的是通过钻井、集热器和地热埋管，利用最深约400米处的地热能。温度水平最高25°C。浅层地热能可通过低温区域供热网络以及可逆热泵系统，为建筑供热及制冷[13]。

深层地热能指的是400米及更深的地下热能的利用。深层地热能可在开放系统（岩石热及热液双热系统）及封闭系统（深层地热埋管）中利用。深层地热埋管的优势在于其地点独立

性，没有勘探风险，但通常只有在已经存在钻孔的情况下，才具有经济可行性。开放系统的决定性优势是热提取量（热输出量大约为1兆瓦热到50兆瓦热以上）远高于封闭系统（最大为几百千瓦热）[13]。热水通过生产井泵抽到表面，通过热交换器提取部分热能。在提取热能之后，热水通常会通过注入井泵送回地下(图44)。在集中供热系统中深层地热能的运用需要同时具有高地热潜力、高热量需求和热密度。

图44：慕尼黑深层地热设备



来源：SWM

容量和产量

德国的典型装机容量是2兆瓦_热到40兆瓦_热[2]，慕尼黑可以达到50兆瓦_热（见下文）。除了部分较老的地热站外，大部分地

热站都是从2010年开始建造的，这也显示出了对这项技术重新燃起的兴趣。地热占比也由之前的不到15%上升到一些供热站的100%

表7：德国各地现有的地热区域供热厂[4]

地区	供热厂名称	立项年	热电联产	制冷	地热装机容量 (兆瓦 _热)	总装机容量 (兆瓦 _热)	2017年总地热产热量 (吉瓦 _热 /年)	地热产热量占比
Aschheim	Aschheim	2009	N	N (RI)	10.7	44.5	66.1 ^{a*} 89.0 ^{b*}	74.2
Erding	Erding	1998	N	N (RI)	7.7	48.8	35.6 ^{a*} 103.0 ^{b*}	34.6
Freiham	Freiham	2016	N	N (RI)	13.0	78.0	27.6 ^{a*} 59.6 ^{b*}	46.3
Garching	Garching	2012	N	N (RI)	7.95	27.95	31.7 ^{a*} 42.1 ^{b*}	75.3
Grünwald/Laufzorn	Grünwald/Laufzorn	2011	Y	N (RI)	40	71	68.5 ^{a*} 285.7 ^{b*}	24.0
Holzkirchen	Holzkirchen	2017	N	N (RI)	21	na	na	na
Ismaning	Ismaning	2013	N	N (RI)	7.2	22	33.9 ^{a*} 46.7 ^{b*}	72.6

Kirchweidach	Kirchweidach	2013	N	N (RI)	max. 30.6	max. 30.6	91.6 ^{a&b*}	100.0
Landau	Landau	2011	Y	N (RI)	5	33	na	na
München Riem	München Riem	2006	N	N (RI)	13	51	66.5 ^{a*} 81.8 ^{b*}	81.3
Neustadt-Glewe	Neustadt-Glewe	1994	N	N (RI)	4	14	16.9 ^{a*} 20.8 ^{b*}	81.3
Poing	Poing	2012	N	N (RI)	8-10	38-40	34.0 ^{a*} 52.0 ^{b*}	65.4
Prenzlau	Prenzlau	1994	N	N (BHE)	0.15*	0.5*	0.4 ^{a*} 2.9 ^{b*}	13.8
Pullach	Pullach	2005	N	N (RI)	15.5	32.5	63.0 ^{a*} 67.0 ^{b*}	94.0
Sauerlach	Sauerlach	2013	Y	N (RI)	4	4	7.8 ^{a&b*}	100.0
Simbach-Braunau	Simbach-Braunau	2001	N	N (RI)	9	46.2	50.5 ^{a*}	na
Straubing	Straubing	1996	N	N (RI)	2.1	7.3	2.9 ^{a*}	na
Taufkirchen	Taufkirchen	2015	Y	N (RI)	40.0	40.0	35.0 ^{a&b*}	100.0
Traunreut	Traunreut	2015	Y	N (RI)	12.0	13.9	26.9 ^{a*} 35.8 ^{b*}	75.1
Unterföhring	Unterföhring	2009	N	Y (RI)	10	30	23.5 ^{a&b*}	100.0
Unterföhring II	Unterföhring II	2015	N	N (RI)	11.3	31.3	33.7 ^{a&b*}	100.0
Unterhaching	Unterhaching	2007	N	N (RI)	38	83	108.0 ^{a*} 144.0 ^{b*}	75.0
Unterschleißheim	Unterschleißheim	2003	N	N (RI)	7.98	23.78	42.0 ^{a*} 64.7 ^{b*}	64.9
Waldkraiburg	Waldkraiburg	2012	N	N (RI)	14	17.5	24.8 ^{a*} 25.3 ^{b*}	98.0
Waren	Waren	1984	N	N (RI)	1.3	10.742	2.4 ^{a*} 10.1 ^{b*}	23.8
total					334.5	800.6	893.3 ^{a*} 1375.5 ^{b*}	

应用

应用主要是用于产热，但也有用作热电联产及制冷的情况（参见表 7 及下文安达赫治（Unterhaching）的实例）。

减少空气污染和温室气体排放

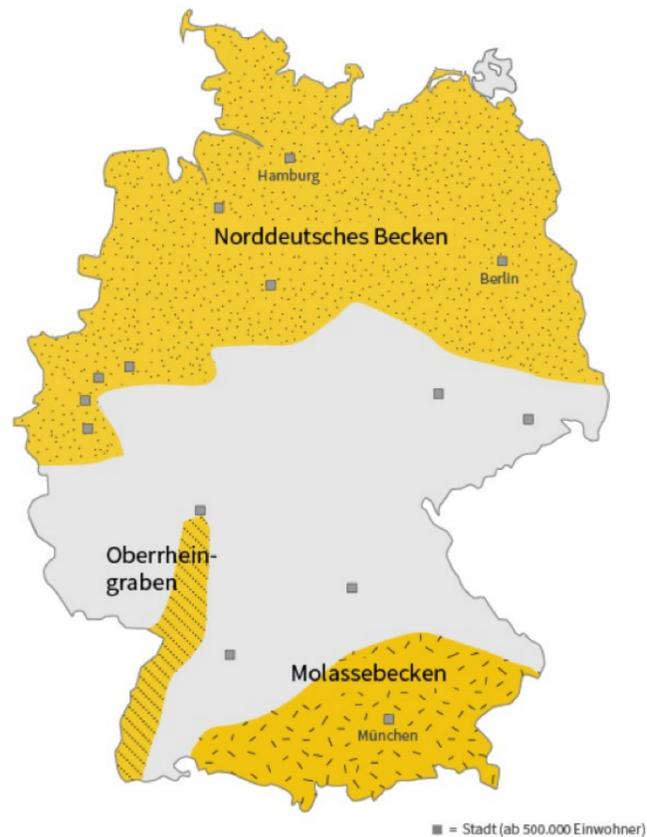
通过使用地热进行区域供热的情况下，由于区域供热网络中没有化石燃料，二氧化碳排放可被降低（或者避免）。安达赫治30兆瓦地热区域供热系统（见下文）每年减排23.4千吨的目标已经实现。从工厂投产（2007年）至2018年，已累积减排二氧化碳约28.1万吨。在安达赫治的具体环境中，每一兆瓦的地热区域供热装机容量大约节省800吨二氧化碳。与基于煤炭的区域供热系统相比，其二氧化碳减排量要高得多。

其次是地热区域供热系统的局部污染问题，与二氧化碳减排相比其好处更为重要，因为供热系统是供热季空气污染的重要来源。

历史与市场发展

德国适合开发地热的地区是北德盆地（North German

图45：德国具有高地热供热潜力的地区（黄色）



图片来源：Deutsches GeoForschungszentrum | Wissensplattform Erde und Umwelt, CC BY 4.0

Bassin) 和北莱茵威斯特法伦州（North Rhine-Westphalia）（参见图 45）。目前，德国共有 47 个正在运行的此类工厂，总功率 337 兆瓦 [1], [2]。欧盟境内有大约 240 个地热区域供热系统 [8]，总装机容量大约 4.3 吉瓦热，产生热力大约 12900 吉瓦时。以下几个欧洲国家在地热区域供热方面有悠久的传统，并针对地热区域供热设定了直到 2020 年要实现远大目标：德国、法国、匈牙利和意大利。尤其是在爱尔兰，用热需求几乎完全依靠地热能。

慕尼黑地区是德国地热区域供热的最突出典范（参见下文章节）。

波茨坦市政公用事业公司（Stadtwerke Potsdam）设计了一个与慕尼黑类似的发展路线：当前天然气在区域供热网络中的占比达到 95%，要通过城市气候保护行动方案，在 2030 年，将此比例大幅压低，支持地热能的发展。初步计划是斥资 900 万欧元，在 2022 年之前打造一个试点工厂，而该公司在区域供热网络上的投资总额为 3.3 亿欧元。

“地热区域供热”中提供了欧洲层面上的地热区域供热案例研究。

除环境效益以外，技术的优势在于占地面积小，运行期间的可靠性和低成本。缺点是初期投资成本高，需要进行地震学分析和钻孔作业。

深层地热的潜力巨大。欧盟人口的 25% 以上居住在适合直接利用地热区域供热的地方。但是，地热区域供热技术目前依然不够发达。要改进这一状况，须解决三个已经确认的关键问题 [3]：

- 去除监管障碍（例如批准程序或优惠），简化运营商和政策制定者的程度。
- 地热区域供热是资本密集型项目（加上 MAP 和德国复兴信贷银行的资金），须开发创新性融资模式。
- 为地区和地方主管当局的技术人员和决策者提供培训，以提供批准和支持项目所必需的技术背景。

德国的经济学和商业案例

德国不像爱尔兰、美国或新西兰一样，拥有高温地热资源。德国没有活火山，也并非直接位于活动板块的边缘地区。但是，地热潜力确实存在，德国这种自然条件下对地热的利用也引起了包括中国在内的其它国家的兴趣。。

在德国，常见的深层地热直接利用形式是区域供热厂或热电联产厂、温泉和空间供热。目前，德国尚在运行的此类型的地热设施有大约 180 个 [4]。2018 年，直接地热应用项目的地热装机容量达到 394.6 兆瓦_热。29 个区域供热和热电联产厂占去了地热容量的最大一部分，总计约 334.5 兆瓦_热。总的来说，德国深层地热利用的装机容量取得了显著的增长，从 2010 年的大约 160 兆瓦_热 增加到 2015 年 336.6 兆瓦_热，再到 2018 年的 394.6 兆瓦_热。由深层地热生产的热量从 2010 年的 716 吉瓦时，增加到 2015 年的 1100 吉瓦时，再到 2017 年的 1377 吉瓦时 [5]。

生产成本和销售价格通常为60欧元/兆瓦时_热，一般在20到80欧元/兆瓦时_热的范围内波动。这取决于本地地热环境（高/低热流、浅源/深源）、社会经济条件和定价政策（千兆瓦时_热或立方米热水）[3]。

两个具体案例：巴伐利亚州安达赫治已经有多年的经验，慕尼黑市有德国最大的上线地热区域供热厂，是慕尼黑市综合脱碳化战略的一部分。

安达赫治

慕尼黑市南边的安达赫治的地热厂是结合区域供热开发地热的先行者。工厂的热功率为30.4兆瓦[7]。一开始，工厂也是基于Kalina循环，生产电力。但是，在2017年，工厂决定停止发电，因为热需求日益增长。安达赫治地热厂的总投资额达到大约1亿欧元，其中1600万欧元用于卡利纳工厂（包括最初10年的维护）。项目得到联邦政府、联邦环境部、巴伐利亚自由州和德国复兴信贷银行可再生能源计划“未来投资计划（ZIP计划）”的资助。摊还期为15年。表8中列出了某些技术和经济参数，表9提供了客户的价格实例。

表8：安达赫治地热厂的技术和经济参数

截至2019年8月 [6]

公司成立日期	09/2002
项目运营期	7年（最终验收：2009年4月）
投资额	大约1亿欧元（其中 1600万欧元用于Kalina工厂）
营业额	大约280万欧元（2008）、大约470万欧元（2009）、大约790万欧元（2010）、大约720万欧元（2011）、大约300万欧元（2012）、大约900万欧元（2013）、大约950万欧元（2014）、大约940万欧元（2015）、大约1140万欧元（2016）、大约1010万欧元（2017）和大约1000万欧元（2018）
雇员	10
补助津贴和贷款	包括未来投资计划“ZIP计划”（联邦政府）的补助；示范项目推广贷款：2240万欧元（联邦环境部BMU）；德国复兴信贷银行可再生能源计划的补助360万欧元；德国复兴信贷银行可再生能源计划的贷款：1990万欧元
投资的摊还期	大约15年
深度	3,350 m（第一个孔2004） 3,580 m（第二个孔2007）
水温	122 °C（第一个孔2004） 133 °C（第二个孔2007）
流量	150 l/s（第一个孔 2004） 150 l/s（第二个孔 2007）
地热能	max. 38 MW _热
区域供热管网长度	约：49 km
区域内供热负荷	约 71 MW _热

长期规划	从安达赫治供应，其中75%的区域供热来自于地热能（管网联结负荷大约90兆瓦）
流体温度	80 – 110° C
回水温度	50 – 60° C
生产的电力（Kalina系统最大3.4兆瓦电力）	410万 kWh（2009-2017）
地热热量产出	970万 kWh（2007 – 2018）
CO ₂ 减排	8.1万吨（2007 – 2018）

表 9：安达赫治地热定价范例

截至2019年10月 [8]

		独户住宅	半独立建筑	小用户
消耗量（千瓦时）		25,000	17,000	10,000
年度成本	欧元；净值	2357	1879	1373
一次性接入成本（新区域）*	欧元；净值		1578	
一次性接入成本（致密区域）**	欧元；净值		2629	

*普通消费者：例如消费水平低于平均水平的公寓，然而，这也可以是保温良好的单户住宅，其能耗大大低于平均水平。

**包括换热站，专用地段5米的区域导热

慕尼黑市

慕尼黑市目前正在建造德国最大的地热热电联产厂（Heizkraftwerk Süd）。这是二氧化碳中和和区域供热愿景的一块积木。到2040年，地热能应满足大部分的区域供热需求。慕尼黑市政供应公司（Stadtwerke München SWM）公布的目标：SWM计划在2025年之前，通过自己的发电厂生产足够的生态电，满足慕尼黑的全部需求。到2040年，SWM将以二氧化碳中和的方式满足慕尼黑的全部区域供热需求。利用地热能是其中一个关键组成部份。气候保护的另外一个要素是扩大绿色制冷，以取代单个的空调系统 [9]。

根据SWM的数据，目前，慕尼黑三分之一以上家庭的供热都是通过热电联产工艺实现，即将发电产生的废热馈入区域供热网络。到2040年，化石燃料将被地热能所取代。与之并行的是，将800千米长的区域供热网升级为绿色供热管网。在慕尼黑南边和临近的南部地区，SWM也有意与临近的社区合作，利用额外的地热能源。SWM位于Kirchstockach和Dürrenhaar的地

热厂将扩建为热电联产厂。位于绍尔拉赫（Sauerlach）的这些设施和地热热电联产厂之后将与慕尼黑的区域供热网络相连接。慕尼黑郊区具有利用地热能的地理先决条件，很可能比德国任何其他地区的条件更有利。来自高渗透性石灰岩地层（白垩土）的热水是地热能的来源。在深度2000到3000米的地下，水温范围在80到100°C以上，是用于供热目的的最佳温度范围。水用泵抽吸到地表，流经热交换器，能量被热交换器提取。经过冷却的水流回到地下。

区域供热厂的容量为50兆瓦，为80000位客户提供服务。目前，已经钻了5口井，温度都超过预期。钻井深度为4000米。到2020年中期，所有六口井的工程都将完工[10]并于2020/21年供热季接入电网。

SWM目前在慕尼黑和地方运营着5座地热厂。到2025年，还会建设另外3座地热厂。

在中国进行试点安装的意见

中国有世界上最大的区域能源系统，超过20万千米的网络为接近90亿平方米的建筑空间供热[11]。

中国拥有巨大的地热能源，主要分为两种形式 [12]：第一种是使用浅层地热能供热的能源（土壤、地下水、空气中提取）。第二种是超过1000米深的深层地热。过去几年间，这两种方法在中国的发展速度较快，技术变得更加成熟，例如河北雄县已经将深层地热能用于区域供热方案。而浅层地热能的利用也取得了长足的发展。

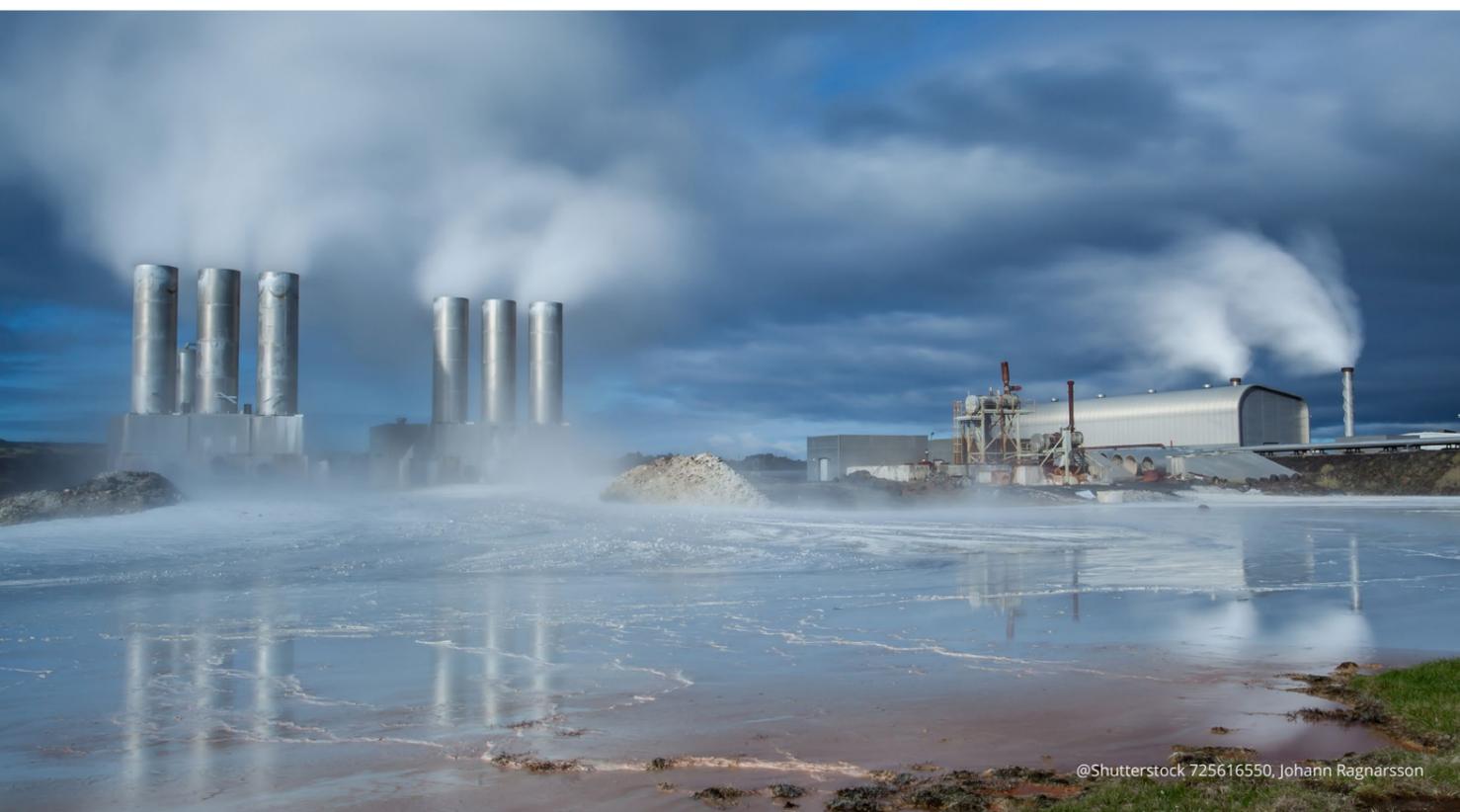
根据地热能规划的当前发展状况，到2020年，京津冀地区的地热供热面积将达到4.5亿平方米，其中京津地区的必需用热量将占到五分之一左右。在地热能资源丰富的其他地区，地热能也是一种重要的能量形式。地热能也有很多其他应用，例如温室供热的农业生产。农村供热的地热能也可能发挥非常重要的作用。在第十三个五年计划期间，我国将在地热供热领域开发一系列支持地热供热的政策。

2018年中国北方地区地热供热面积达到了近2.6亿平方米，包括浅层地热和中深层地热供热，主要分布在北京、河北、天津、河南、山东、陕西等地，供热面积都在2000万平方米以上，北京主要是浅层地热利用，甘肃、陕西等地都有中深层地热供暖示范以及地岩热利用项目，地热供暖应用技术已经基本成熟，从技术角度可以推广。

地热供暖安全性高、单位运行成本低、低碳、环保、清洁、舒适。但是建设投资大、选址受地域条件限制，主要适于地热资源条件良好、冬季寒冷有供热需求或夏季炎热有制冷需求的地区。地热利用以供暖为主兼顾温泉洗浴、温室农业和供应生活热水等。

中深层地热在推广应用要求中要求地下水做到100%回灌，目前河北、山东部分地区对于中深层水热型地热供暖政策相对偏紧，河南地热供暖支持政策较多。陕西、甘肃等地积极推广利用地岩热供暖。

中国的浅层地热利用技术较为成熟，中深层地热以及地岩热的开发利用技术还在试点和发展中，针对不同地质条件，涉及钻探难度、成本、回灌、深层地埋管换热等问题，是未来的一个主要研发方向，德国在这方面有较为成熟的技术和经验，可以与中国相关企业加强技术交流与项目合作。



@Shutterstock 725616550, Johann Ragnarsson

4.9 带有燃气热电联产、热泵和季节性储热的集中供热/冷网

区域供热（DH）在各国的使用状况并不均衡。在欧洲，北欧和东欧国家的区域供热占比更高。如果将供热处于次要地位的中国东部地区排除在外，那么中国的区域供热比例就非常高。

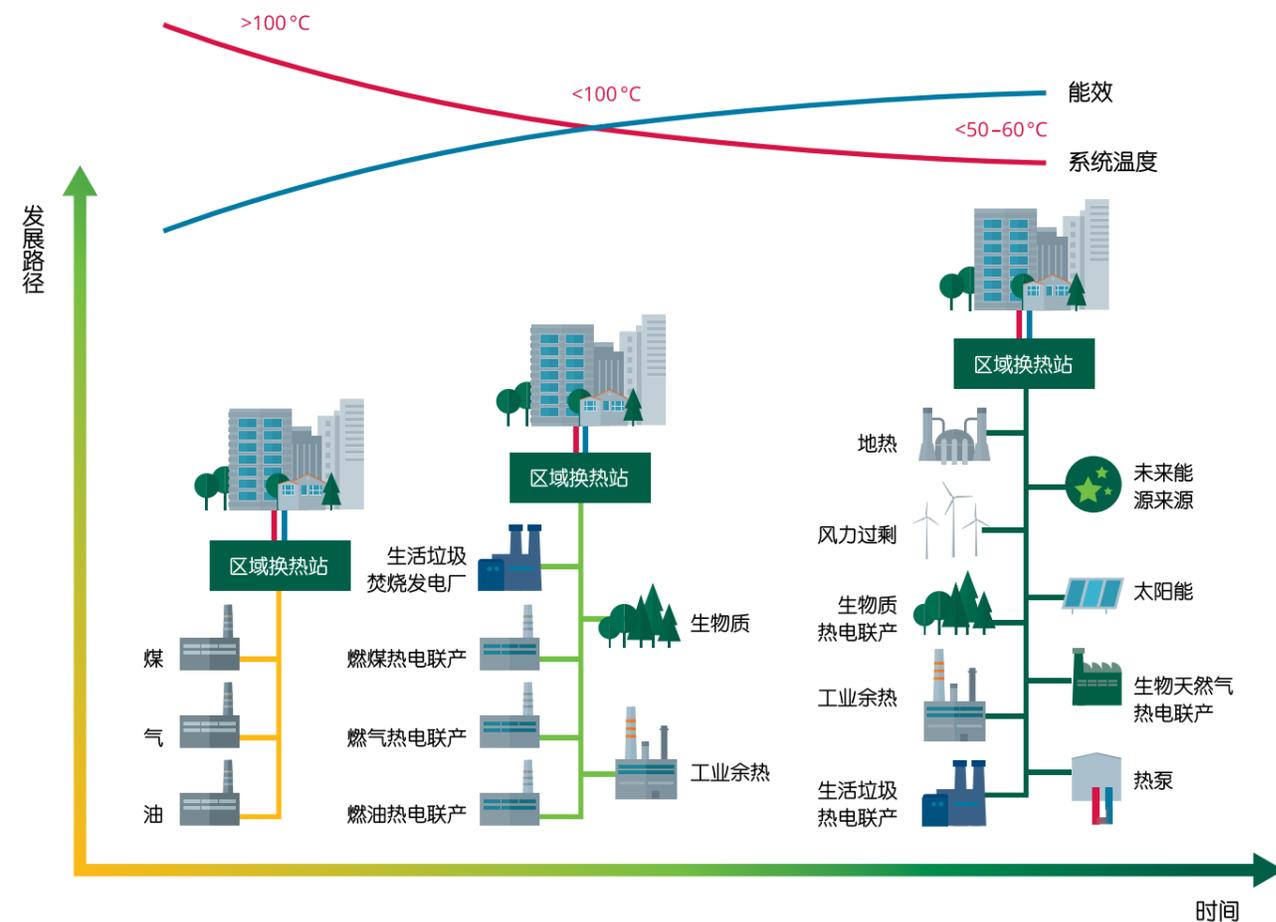
表10：区域供热高比例国家的区域供热特征[1]

	中国	德国	丹麦	保加利亚	芬兰
区域供热装机容量（千兆瓦 _{th} ）	462.6	51.4		6.2	22.8
区域供热输配管线长度（1000千米）	178.1	1.4	30.8		
总供热面积占比	55%（北方地区）	13.8%	64%	12%	39%

与供热要求相结合，制冷也有越来越多的需求。这可以通过安装供热和制冷组合网络得以实现。

区域供热的潜在热源为工业废热、热电联产厂燃烧余热、生物质电厂、地热和太阳能系统（中央太阳能供热）、大规模热泵、制冷废热（例如数据中心适应）及其他能源[14]。因此，区域供热系统从使用化石燃料进化到使用灵活的多能可持续能源，取得了长足的发展。除了能源结构的变化以外，区域供热网络的温度水平也下降了，可以集成新能源，提高能效（图46）。

图46：区域供热系统从使用化石燃料进化到使用灵活的多能可持续能源



欧洲的区域供热目前大约服务6000万欧盟公民，还有1.4亿人生活在至少有一个区域供热系统的城市[2]。

此章节描述了用于供热和制冷目的的不同技术的组合。它表

应用	区域供热和制冷
目标群体/客户	城市；私人供热/冷却网络运营商
优点	<ul style="list-style-type: none"> 可提供制冷和供热，通过电热泵实现将热量用于制冷的最佳应用 通过热泵热电联产和蓄热设备，将供热/制冷市场与电力市场组合的高灵活性系统 提高热泵的经济效率
挑战	制冷网必须有额外的投资
成本	投资成本（德国，单位：欧元）：1亿欧元； 发电成本（德国）：0.065–0.2欧元/千瓦时

技术描述

区域供热系统中的化石燃料（类似天然气CHP）可以被热泵、蓄热设备、生物基热电联产和风电的组合取代。此种区域供热和制冷系统也有助于平衡能源系统中，可变风电和太阳能发电不断提高的占比（电制热，即三弃电量生产转化为热能用于集中供热）。在风力发电量低的期限内，需要可调度的备用电力和热生产。生物基热电联产（CHP）在高电价的时间段运行，因为价格是基于正在运行的最高成本的生产方法的边际成本。在高电价、低用热需求的时间段，热电联产厂的余热也可以储存在蓄热设备中。通过这种方式，蓄热设备可与可变风电生产交替运行，从而维持并提高热电联产厂的总效率。原则上，当使用热泵、热电联产或者利用过量电力或热量生产全部热量时，系统效率达到其最大值[3]。

供热网络提供了利用不同能源的可能性，包括所谓的废热，以高效、相对灵活的方式将这些不同能源大规模结合。此种结合的一个基础就是容量范围从几个小时或几天到长期蓄热的蓄热器。欧洲国家区域供热的长期目标是将供热与电力部门挂钩，且在必要的情况下，与运输部门挂钩，以提高灵活性，实现能源供应的脱碳。

容量和供热量

这些热网中使用的热泵容量目前已经达到100兆瓦，但根据碳中和方法（如一个完全脱碳的大城市，见下文赫尔辛基的案例），可能超过1000兆瓦。

应用

一般情况下，主要应用于供热和制冷，其应用实例从较小型社区的较小型本地电网（参见下文多尔恩斯泰因（Dollnstein）或赫滕（Herten）的实例）一直到大的城市。

明区域供热和制冷系统中的化石燃料可以被取代，主要是通过集成热泵、燃气热电联产（利用生物天然气或天然气）、蓄热设备或太阳能光热，以可再生的方式生产绿电。

减少空气污染和温室气体排放

通过基于热泵的区域供热网络，减少二氧化碳排放取决于热泵运行所需电力产生的间接二氧化碳排放量。因此，电力结构的完全脱碳对实现低碳发热具有重要意义。所以芬兰等酷寒国家（赫尔辛基的案例）都在寻求热泵与风能的耦合。理想的燃气热电联产是基于生物质能源的，它避免了使用天然气热电联产所产生的排放。

历史与市场发展

尽管区域供热已经是历史相当悠久的历史，供热制冷网与燃气热电联产、热泵和蓄热设备相结合或者类似的组合还是相当新颖的方式。在文献[4]中“第五代区域供热和制冷系统5GDHC”的标题下讨论了这些理念。高温区域供热系统依然要遭受巨大的热量损失和高安装成本。尤其是在夏季，很多区域供热系统的运行一般只是为了满足生活热水的需求，此时的网络热量损失可能达到供应能量的30%的左右，因为水在管网中的保留时间较长。出于这些原因，目前的研究集中关注的是第四代和第五代区域供热制冷网络，这些网络可以在低温下运行，从而实现高效率。在第四代区域供热系统中，同样的管道无法同时为不同建筑提供供热和制冷服务。这是第五代区域供热制冷技术正在试图解决的挑战。第五代区域供热制冷网络还处于早期发展阶段，欧洲正在运行的几个系统也主要是作为试点项目。很多此类系统的运行方式都有别于传统的区域供热制冷技术。例如，它们在0℃到30℃的温度范围内，为分散式水源热泵（WSHP）供水。此外，第五代区域供热制冷网络允许网络温度自由浮动，利用准无限的固有热源。相比第四代区域供热，第五代区域供热制冷的几个关键附加值包括：输配温度接近地面温度（从热量损失的角度来看是“中和”的）；可独立以供热或制冷模式运行而不依赖于管网温度的能力；双向及分散式能量流动。因此，第

五代区域供热制冷属于智能热网概念。此种技术利用混合变电站，加强了智能能源系统中电网与热网的部门耦合。第五代区域供热制冷系统的传统优势在于可以找到中心化解决方案，在城市地区安装季节性蓄热设备，因为城市地区空间可用性有限，无法为单个地源热泵安装地下热交换器。

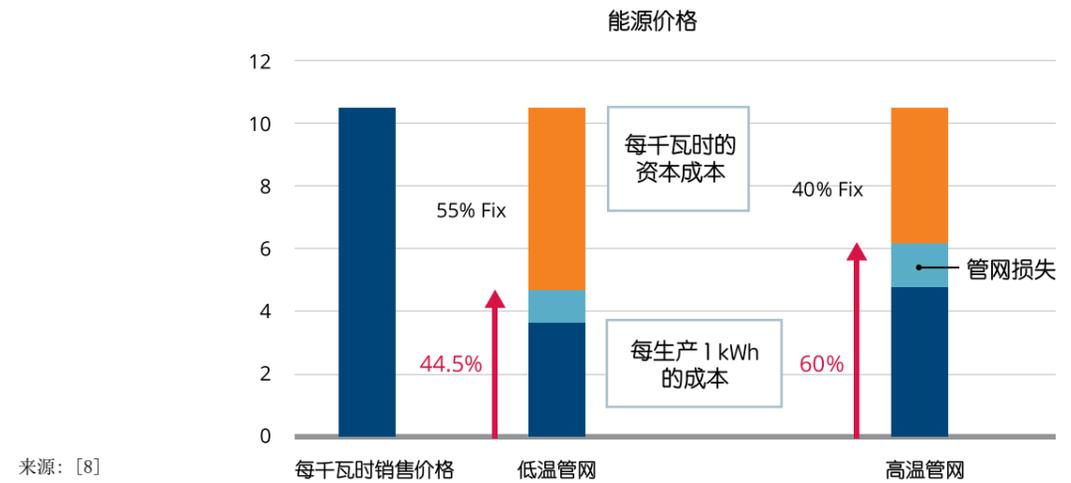
下文的实例描述了此种第五代区域供热制冷的一些要素。

经济学和商业案例

海德堡能源和环境研究所（2019）[5]分析了先进区域供热网络的经济状况，给出了不同的范例配置。范例网络的热成本计算值大约在6.5到20.0欧分/千瓦时之间。将此种成本与基准技术（燃气锅炉/太阳能8.0到11.0欧分/千瓦时、颗粒/太阳能8.8到12.6欧分/千瓦时、热泵12.6到16.7欧分/千瓦时）相比较，首先可以更加明显地看出一点：相比标准燃气/太阳能系统解决方案，网络系统对财政补贴有很高的需求。

图47：多尔恩斯泰因供热/制冷的销售价格和组成部分

资本成本、管网损失和生产



来源：[8]

赫滕市（德国）的热泵和区域供热 [9]

对城市进行了深度调查，以实现区域供热网络的切实脱碳。研究从技术和经济方面，分析了各种技术与现有区域供热网络的融合，例如太阳能、生物质锅炉、垃圾焚烧厂和热泵，其主要焦点放在大型热泵上。赫滕市位于德国的鲁尔区。赫滕市面积37平方千米，居民30000户，总计大约60000人。2011年，赫滕市的综合二氧化碳排放量大约为41.9万吨。其中，私人家庭的空间供热SH和生活热水DHW占到32%左

多尔恩斯泰因市组合供热制冷（德国 [6], [7]）

供热网络为多尔恩斯泰因的现有建筑（住宅建筑、市政厅和学校）提供热量。一开始，总共规划了42个对象，截至2018年3月，已在为其中的27个对象供热。在冬季，网络作为传统供热网络运行，流体温度为80℃。通过一个水-水热泵（430千瓦-电，年均COP3.3）和一个液体-燃气热电联产厂（190千瓦-电）提供热量。如果必要，可以启动液化石油气锅炉（200千瓦_热）。在过渡期，根据外部温度，将流体温度调整到70到75℃；如果必要，以分散热泵为需要供热的对象提供热量支持。在夏季，网络以25到30℃的流动温度运行，主要通过太阳能系统（大约150平方米，安装在供热中心的屋顶和体育馆内）和安装在建筑工程内分散式热泵实现。热电联产机组为中央热泵供电，因此它须根据用电需求来调节。容量为25立方米的蓄热罐在夏季和过渡期用作缓冲罐。中央热泵与蓄热设备配合运行，蓄热设备中的热量来自于热电联产的发动机废热以及（如必要）太阳能。通过公共公司Energie Dollnstein维护供热网络。2014年开始试运行，总投资成本达到160万欧元。

右。2011年，住宅部门的总用热需求大约为470千兆瓦时，其供应来源为：天然气（47%）、区域供热（28%）、加热油（16%）、煤炭（5%）和电（4%）。

赫滕的区域供热网络目前主要通过燃煤热电联产供能，这也是很多德国城市的典型做法。基于煤炭的区域供热价格低廉，这是对其他供应方案的一项主要挑战。研究表明通过调整影响参数，基于热泵的区域供热系统可能被设计与当前燃煤区域供热系统具有相同的供热成本。

表11：赫滕区域供热系统未来可能的选择概述

Scenario	Decentralised supply	Thermal renovation	DH expansion	DH supply
1. RES for decentralised supply/no renovation	Continuous transition to RES supply and efficient fossil fuel boilers	No renovation (same demand as in 2014)	No expansion (same size as in 2014)	No replacement (2014 supply with coal CHP)
2. Thermal renovation		With renovation (52% demand reduction until 2050 compared to 2014)		With replacement (ST)
3. Ren. + Solar thermal in DH				With replacement (HP)
4. Ren. + Heat pumps in DH			With expansion	With replacement (ST + HP)
5. Ren. + RES DH expansion			No expansion (2014 size)	With replacement (more waste incineration heat)
6. Ren. + Waste incin. in DH			With expansion	With replacement (ST + HP + waste incineration heat)
7. Ren. + Roadmap				

来源：[9]

确认了五个主要杠杆[9]：首先，将容量因数从0.2提升到0.75（相当于将年运行小时数从1950增加到6550），大幅降低供热成本。其次，将平均供给温度从80℃降低了60℃也会大幅降低供热成本。但是，尽管这一选择对新建的区域供热系统而言比较直截了当，但它却涉及对区域供热系统的改造，可能产生额外的成本。第三，通过去除与可再生能源上网电价相关的税款降低电价，也可以大幅降低热成本。第四和第五，通过减少热泵的资本支出（通过补助或技术学习）及基于每小时现货市场电价运行热泵，进一步（但并非显著）减少供热成本，从而为电网提供灵活性。即便所有这些选项都予以落实，燃煤供热的二氧化碳价格仍然需要达到至少20欧元/吨二氧化碳，才能实现成本平价。

赫尔辛基区域供热和制冷系统

在芬兰首都赫尔辛基，Helen Ltd公司（Helen Oy）经营一个基于热电联产（CHP）的区域供热制冷系统（图48）。赫尔辛基90%的用热需求通过高效的区域供热实现。区域供热网络的长度：超过1350千米，每年扩大15到20千米[10]。表12展示了当前系统的主要参数以及实现赫尔辛基100%无化石燃料情景的可能布局。

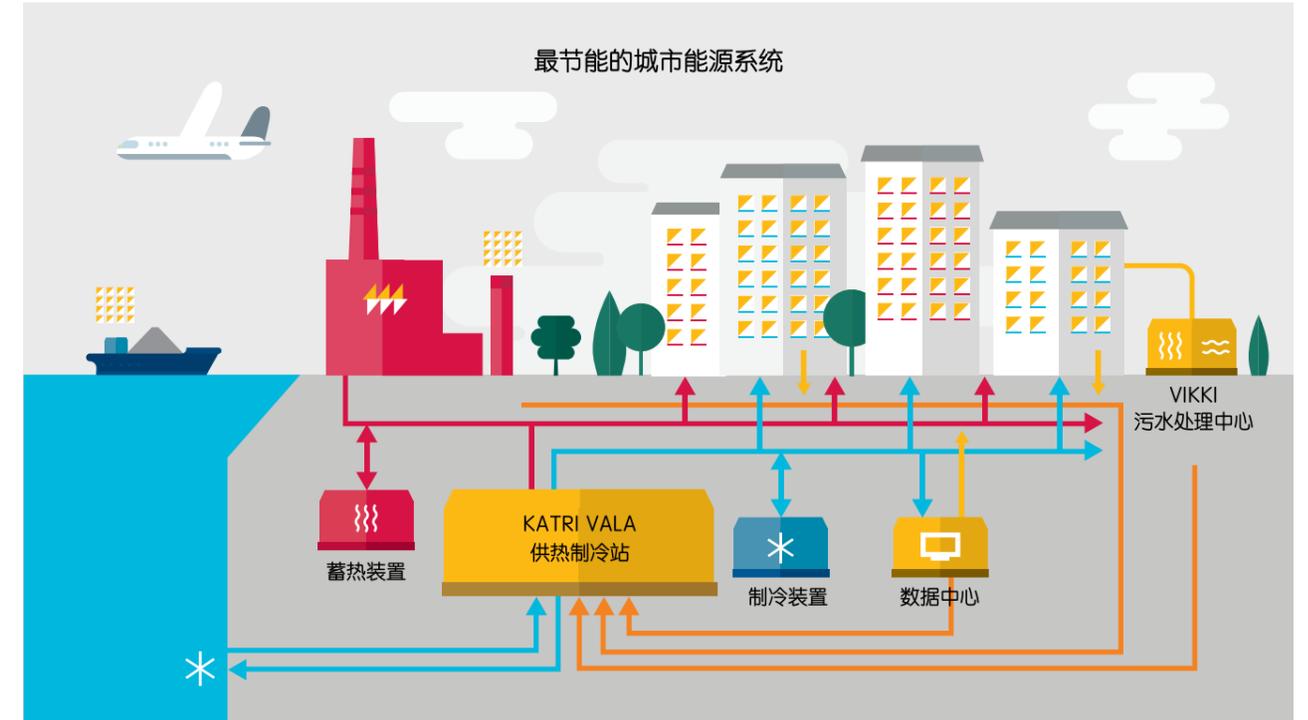
区域冷热联供（CHC）系统的基础是供热需求、制冷需求与剩余能量的同时发生。在制冷需求达到峰值的暖季，办公楼需要制冷（连接的制冷量约为200兆瓦），而隔壁的公寓楼需要热水。办公楼，包括购物中心、数据中心等，所产生的过量热可用于产生热量，而不是冷凝到空气中。

在冬季，赫尔辛基通过高效热电联产厂供热；在夏季，通过区域制冷网络收集太阳能废热，用于加热热水。区域冷热联供系统一整年都可收集数据中心的过量热和提纯过的废水，将热量用到需要的地方。可再生能源区域制冷产生的区域热量，会流回到与区域供热和制冷系统相连接的物业中使用。

在2006年建成的生产基础设施以及10个吸收装置的基础上，基于区域冷热联供的新区域制冷生产新加入了一个组合热泵厂，共有五台热泵。系统的热泵制冷总容量为60兆瓦。工厂的供热装机容量为90兆瓦。

强力推动此项发展的一项政策措施是：芬兰议会最近批准了一项政府提案，将自2020年5月1日起禁止使用煤炭产生能量[11]。

图48：赫尔辛基基于热电联产（CHP）的区域供热/制冷（DHC）



来源：[12]

产热单元	装机热容量 Helen Ly, 2017	赫尔辛基100%无化石燃料情景下的装机热容量和能源
热泵	100 MW	1100 MW, 使用环境和废热, 主要是风力
热电联产, 地区供热	1300 MW	300 MW (+200 MW 电力), 使用生物质
仅有加热功能锅炉用于高峰热供应	2000 MW	1100 MW, 使用由清洁电力(风能, 太阳能, 核能)或生物质制成的液体燃料和合成气
电锅炉用于将高峰余热转化为热		200 MW, 主要使用风力
储热	0.002 TWh	0.015-0.03 TWh - 即将在蓝莓岛(Mustikkamaa)33储存的热量为0.014 TWh, 该系统已经可以正常运行

来源: [8]

在未来情景中, 赫尔辛基用于区域供热的大部分化石燃料可能会被热泵(1100兆瓦)取代, 其数量会达到当前Katri Vala电厂的十倍。有些热泵会安装在机房、办公楼、购物中心、学校、企业和物业企业中。为了产生这些热泵消耗的电力, 需要大约170台风力涡轮机(700兆瓦), 这些风力涡轮机可能安装在具有理想风况的区域, 比如博滕(Ostrobothnia)或拉普兰(Lapland)。

除热泵和风力以外, 还需要蓄热技术来持平风电和太阳能的电力供应。在寒冷气候条件下, 蓄热设备的成本要远低于蓄电设备。实际上, 在把蓄热设备纳入到区域供热网络中时,

成本可能低至蓄热设备的1%。住宅建筑的蓄电设备和需求响应, 是适合从几秒到几个小时的供应变化的适当解决方案。但是, 蓄热设备可用来储存几天、几周乃至几个月的能量。

每周蓄热可为赫尔辛基提供充分的灵活性, 例如, 正常情况下, 低风力的持续时间不会超过几天。在风力不足的时候, 可以通过区域供热网络、以具有成本效益的方式满足需求, 即利用蓄热以及灵活、绿色的热电联产(CHP)设备。系统可基于市场电价, 在不同能源之间切换。当风力强劲、电价便宜的时候, 热泵可以使用风电, 填满蓄热设备。当风力不足、电价昂贵的时候, 热泵清空蓄热设备, 启动生物热电联产设备。

在中国进行试点安装的意见

中国有世界上最大的区域能源系统, 超过20万千米的网络为接近90亿平方米的建筑空间供热[13]。但是, 这些区域供热网络的一大部分都是使用化石燃料运行。对于现有网络, 过渡到以可再生能源功能的第五代区域供热网络是合理的方案。但是应该注意到, 为了降低区域供热网络的温度, 建筑存量还必须满足适当的标准。但是, 通过使用第五代区域供热网络, 可以节省一次能源和温室气体。

供热制冷网与燃气热电联产、热泵和蓄热设备相结合的区域能源系统适用于具有多种能源需求, 能源消费量大且集中的地区, 有冷、热负荷需求或有常年热水负荷需求的公共建筑, 以及对供电安全要求较高的单位, 如: 医院、宾馆、商业综合体、高档写字楼、交通枢纽、数据中心、机关和工厂等, 用电、用冷(热)负荷时间长, 经济效益好。区域能源系统定位是城市大型商业、公共建筑或工业区内的集中供暖或热电冷三联供, 通过减少能源中间环节损耗, 以“按需供能”方式, 在用户端实现能源的“温度对口、梯级利用”, 是集地源热泵、水源热泵、蓄热蓄冷装置、可再生能源等构建的多能互补的智能微网, 是未来分布式能源一个重要的发展方向。实施区域要尽量靠近冷、热负荷中心区域, 尽可能靠近供电区域的主配电室, 京津冀地区、长三角、珠三角等经济发达地区是主要应用区域。

在中国的一些应用, 比如北京燃气集团指挥调度大楼是北京市实施的第一个楼宇式天然气冷热电三联供工程, 装有燃气内燃机发电机组2台, 总发电容量1205kW; 发电余热为空调系统提供冷、热水, 发电余热供冷、热不足部分由天然气补燃补充。项目存在的一个问题是目前燃气发电机组采用独立运行方式, 因为不能并网运行, 造成发电机在夜间谷电时段也需要运行、负荷很低、运行的经济性下降、维护成本加大。北京蟹岛三联供能源中心设有燃气内燃机4台(3MW)、余热烟气热水型冷温水机组、水源热泵、蓄热及蓄冰装置、太阳能热利用系统, 可以供电、供热、制冷、提供生活热水。沈阳东宇大厦采用生物质冷热电三联供分布式系统, 将生物质锅炉蒸汽用于汽轮机发电, 乏汽用于建筑采暖及制冷。

实施过程中, 要实现多种能源品种的综合、集成利用, 根据用户需求个性化制定能源利用策略, 尽可能提高系统能效。

4.10 工业余热回收

工业余热是由使用工艺用热的工业流程产生的。从技术角度来看, 余热可被描述为工业流程产生的不需要的热量[1]。从社会角度来看, 它可以描述为工业流程的副产品、目前无法利用的热量, 但是这些热量可用于社会和工业[2]。此种余热可被用于为区域供热和制冷网络供能。或者, 热能也可以通过卡车或铁路运载的热容器运输[3]。

工业余热可在流程内、公司内或者跨公司使用。使用工业余热时, 余热的温度水平是决定性因素。须区分高温、中温和低温[4]。大多数情况下, 高温和中温范围(>150°C)的余热可用于内部流程, 或者用于发电[5]。低温余热通常无法用于此目的, 因此, 低温余热最大的利用可能是用于为区域供热和制冷网络供能。

应用	在住宅和非住宅建筑内, 使用工业过量热进行空间供热或制冷和生活热水供应或者制冷
目标群体/客户	与工业连接的区域供热网络附近的城区住宅及非住宅建筑
优点	<ul style="list-style-type: none"> 使用不需要的工业余热 已经验证的技术 减少温室气体排放
挑战	<ul style="list-style-type: none"> 需要额外的(部分资本密集型)基础设施 工业运营商与区域供热网络运营商之间的合同 监管避免对生产流程的负面影响
成本	20-50欧元/兆瓦时 _热
CO ₂ 排放因子	0g/kWh _热

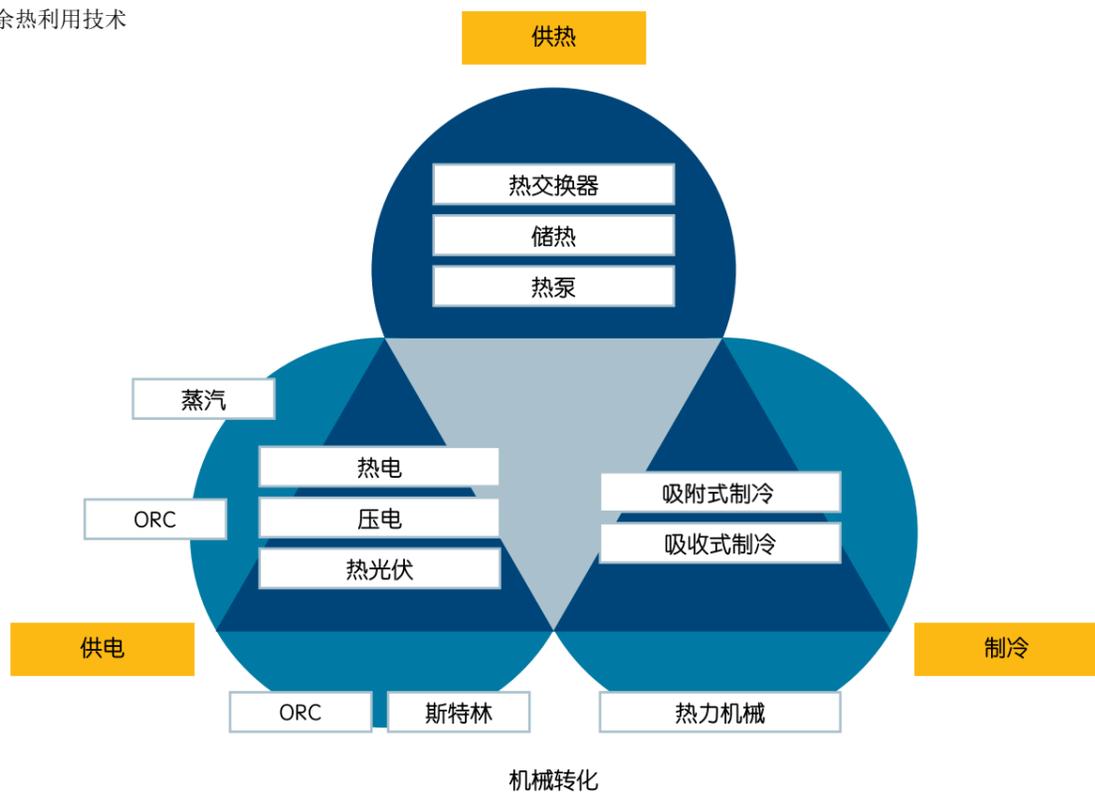
技术描述

使用工业余热的技术

图49展示了余热间接应用的各种可能性。余热可以用于发电、提供机械能或者供热制冷。要利用工业余热, 主要会用到热交换器、蓄热设备和热泵。可以从废气、排气、冷却水或废水中回收余热[6], 然后馈入区域供热网络。图50展示了废气余热回收的原理图。热交换器构成余热回收系统的基本组件。热交换器将现有余热导入温度更低的介质, 实现其

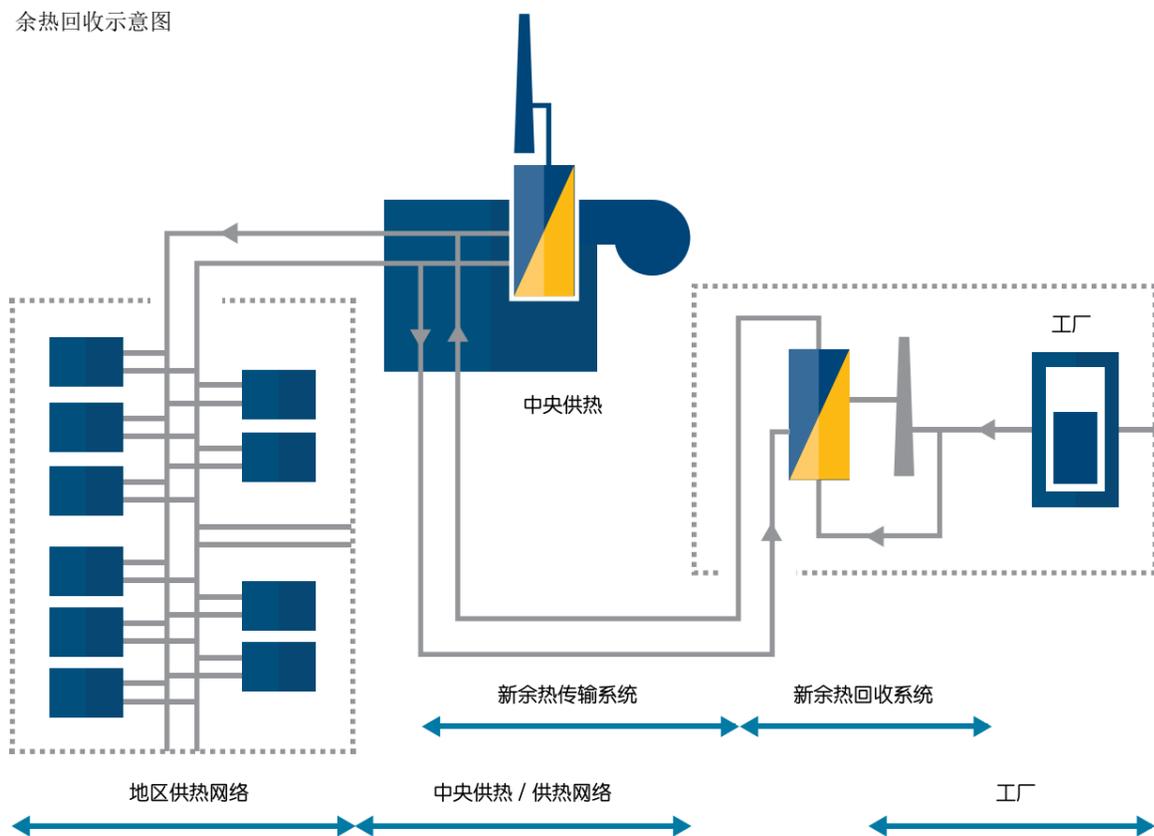
可用性。蓄热设备提供了临时灵活性调节的可能性。大多数工业设备会持续产生余热。但是, 住宅和非住宅建筑的用热需求在一天及一年内都会波动。热泵负责将现有余热提升到更高温度水平。如果现有余热的温度水平低于连接供热网络的温度, 则这一过程尤为必要。

图49：余热利用技术



来源：[7]

图50：余热回收示意图



来源:改编自 LfU-Bayern [6]

容量和供热量

热容量依赖于可用余热的热量、余热的温度水平以及与用热需求的距离[5]。因此，可能的容量主要取决于影响因素，必须根据每一具体案例确定。

在[5]中，调查了在德国区域供热网络中使用余热的可用潜力。德国报告的总技术潜能为23到29太瓦时_热/年。考虑到网络的经济效率，德国的总潜能为19-21太瓦时_热/年。2017年注入区域供热网络的能量约为85太瓦时。

应用

工业余热应在产热的公司内部使用。如果因为温度低或者缺少用热需求而无法实现，则余热可用于建筑内的空间供热和热水供应。为了在建筑内的工业流程中利用余热，必须通过区域供热网络或热容器运输能量。在存在大型工业企业、用热需求高的地方，此种设施尤为有用。

与其他技术的重要组合

在安装使用余热的系统时，必须仔细避免设施中腐蚀性成分的冷凝[5]。某些情况下，必须通过额外的烟道气清洁，来去除腐蚀性成分。或者，可以选择耐腐蚀材料打造热交换器及其他设施。

如果现有余热的温度低于馈入区域供热网络所必需的温度，则必须提升此温度水平。出于此原因，很多应用中必须使用热泵。([1]&[8])

在某些设施中，建议安装备用装置以保障运行[9]。这意味着：一方面，工业厂房依然要有制冷设施；另一方面，区域供热网络中要有备用设施。此外，还可能将个别系统去耦，以便它们能够独立运行。

减少空气污染和温室气体排放

在评估工业余热的利用时，二氧化碳排放最主要还是取决于系统限值的定义。如果假设热能可作为自由资源使用，则工业过量热的使用不会形成额外的温室气体或污染物排放。因此，系统对本地减排有巨大贡献。但是，如果假设工业余热的使用是取代了其他区域供热生产商，则不一定总有可识别的积极效果。这首先取决于当前的电力结构。比如，如果热电联产厂停产，则剩余的电厂必须弥补热电联产厂的发电量。这甚至可能导致温室气体的排放量相比热电联产厂更高[10]。

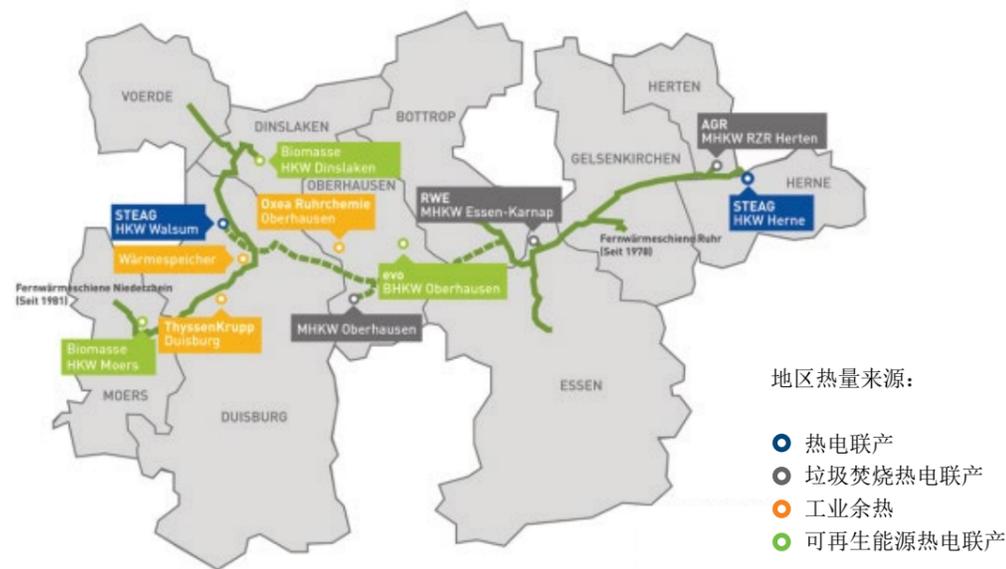
历史与市场发展

早在19世纪，人们就已知悉余热的回收技术。在20世纪，多次技术飞跃让余热的使用成为可能。直到1960年到1970年之间，随着城区的扩张以及复杂新建筑的建设，工业余热才被馈入区域供热网络。但是，德国区域供热网络的扩张远低于斯堪的纳维亚和东欧。20世纪80年代到90年代，更多的人开始考虑利用余热的问题，因为热电联产厂的技术取得了巨大的进步。尤其是，使用燃气蒸汽联合涡轮机工艺的类型。[11]

在2016年，德国就有了“在商业企业中推广余热避免及余热应用的指导方针”。此项指令为商业公司提供财政激励，鼓励它们在避免和使用余热方面进行技术开放性投资。为公司提供的支持以贷款还款补贴的形式发放，由德国复兴信贷银行提供资金。此种补贴支持是针对避免及使用余热的新建筑或者厂房及连接管道的扩建或现代化改造项目。拨付的资金用于从内部避免余热的产生、在外部使用余热、使用余热发电、余热利用方案的筹划、实施和监控。在2016和2017年，德国总共资助了179个案例。这一举措带来了一年123500吨二氧化碳减排量以及一年48万兆瓦时的能源节约量。[12]

德国也有其他的法律和推广措施，例如《热电联供法案》及供热网络的推广[5]。

图51: 莱茵鲁尔 (Rail Rhein-Ruhr) 的区域供热



来源: [15]

莱茵鲁尔轨道的区域供热——2009年,北莱茵-威斯特法伦州建成了使用工业废热和热电联产设备的本地供热网络,为超过40万栋建筑供热。所有建筑的总用热需

求达到1.8千兆瓦时。年温室气体减排达到10万吨/年。二氧化碳的减排成本低于50欧元/吨二氧化碳。2010年的年度热价(不计补助)为7.49欧元/千瓦时。[15]

德国的经济学和商业案例

在巴登-符腾堡州卡尔斯鲁厄(Karlsruhe),上莱茵矿物油精炼厂产生的工业余热自2010年起被馈入城市的区域供热网络。通过区域供热,为多达43000户家庭供能。项目总投资金

额为5400万欧元。年温室气体减排达到10万吨/年。2019年的热价(不计补助)为6.08欧元/千瓦时。

图52: 卡尔斯鲁厄工业用地上的热交换器



来源: [9]

因为不同区域有不同的框架条件,所以关于使用余热能进行空间供热和生活热水供应的经济可行性综述可能只适用于有限的范围。

投资成本为热交换器和传统管道的专用性投资成本。[6]中列出了此种成本,为70到450欧元/千瓦余热容量。取决于具体的应用,也可能增加热泵及蓄热器的投资成本。[5]中的结果表明大多数运营的热产生成本在20到50欧元兆瓦时热之间。如果热能必须提高一个更高的温度水平,就必须使用热泵,从而造成此种成本的相应增长

对具体工程的明确评估务必要考虑此工程的具体环境。经济可行性取决于过量热利用和地方区域供热网的经济可行性,因此:

- 可行性高度依赖于可用的余热供应及其与用热需求之间的距离[13]
- 余热的可用数量越高,专用性投资成本就越低[5]
- 用热需求密度越高,地方供热网络的安装成本就越低[16]
- 用热需求密度越高,网络损失就越低[14]

在中国进行试点安装的意见

中国有世界上最大的区域能源系统,超过20万千米的网络为接近90亿平方米的建筑空间供热[17]。出于此原因,将工业废热馈入现有供热网络可能非常有用。这样可以取代供热网络中使用的化石燃料,从而节省一次能源、减少温室气体排放。

中国工业余热资源丰富,蕴含的能量约是全国供热能耗的3.5倍。北方地区对热量需求很大,工业余热供热是最节能,最环保的一种供暖方式。工业余热资源具有分散性、间歇性与不稳定性等特点,中低品质余热资源占其中的50%以上,工业余热主要集中在冶金、化工、建材、玻璃、造纸、纺织、机械等行业,高品质余热资源利用较为充分,中低品质余热资源利用较少。北方地区采用工业余热供暖,需要满足供热安全稳定连续的要求,实施过程中容易受到环保限产停产要求影响。

工业低温水的余热回收一般采用蒸汽吸收式热泵、电动热泵等方式,热泵具有较高的COP值,可以大量回收低温水中的热量,因此具有较好的经济性,供暖运行成本比较低。

工业余热利用适宜性方面,主要是因地制宜,选择具有示范作用、辐射效应的园区和城市,统筹整合钢铁、水泥、电力等高耗能企业的余热余能资源和区域用能需求,实现能源梯级利用。中国河北省、山东省、山西省、辽宁省工业余热利用规模较大。在试点过程中,要评估热源与热负荷距离、热负荷强度等影响经济性的因素以及是否会受环保“限产能或关停”影响,同时余热利用技术要与生产工艺相匹配,提高整体效益。



5. 综合讨论与结论

图53以五个标准综合评价了上章提到的十项可持续的供热技术:

- 温室气体减排潜力:** 所有选定的技术都有很大的温室气体减排潜力, 它们将在中长期(2030年和2050年)的时间段内起到重要作用。当然, 对于使用电力的技术(如热泵和流体循环泵), 其具体的温室气体减排量还取决于电源结构。中国和德国现有电力系统中的煤炭占比仍然较高, 因此这些靠电力驱动的技术的减排潜力仍然有限。但随着德国退出煤炭战略的出台以及未来电力系统中可再生能源占比的进一步增加, 这些技术的温室气体减排潜力可以得到充分发挥。
- 减少区域污染的潜力:** 所列举的技术也都有很大的环境效益。对于某些生物质供热技术来说, 可能只部分减少了排放, 具体的环境效益还取决于用户的行为习惯。但对于其它大部分技术来说, 基本不会产生污染排放; 当然, 如果从全生命周期的角度来看, 具体的环境效益也和电源结构及发电厂的减排措施有关, 这与温室气体减排的情况相同。

- 资源:** 在资源方面, 我们关注对于非生物(包括地下水、地表水)和生物资源的可持续性使用和土地面积等问题。特别是, 生物质是一个相对有限的资源, 其它领域(如交通、工业等)也需要生物质。对于其他技术来说(如太阳能集中供热), 土地面积可能是一个问题。对于地热来说, 地下水资源和地震风险等可能是需要考虑的因素。
- 总成本:** 与常规技术相比, 本研究中所列举的技术的总成本(平准化供热成本)还是相对较高, 有一些比常规技术高30%-50%。需要强调的是, 这些技术在中国和德国的成本无法直接进行比较, 比如某些常规技术(如冷凝锅炉)在德国的造价也比中国高很多。下一步可以对这些技术在中国的经济性进行更加深入的分析。另外还需要强调的是, 随着未来技术的进步, 全球平均成本会进一步有所下降。
- 市场推广:** 所列技术中有一半已经处于市场推广的某个阶段(如带减排装置的生物质炉具)。而其他的技术, 例如更复杂的光伏光热集热器与热泵的结合还处于小范围推广或过渡阶段(太阳能光热站或者深层地热)。需要强调的是, 所有列举的技术都有着越来越高的市场需求, 随着成本的不断下降, 可以进一步开发市场潜力。

图53: 十种所介绍的可持续供热技术的综合评价



注:
 * 对生物和非生物资源的可持续利用情况, 包括水和土地面积
 ** LC0H: 平准化供热成本, 与常规技术比较
 # 与电源结构相关

前面分析了10种清洁供热技术路线在中国的应用情况以及适宜性, 目前每种技术路线都有不同规模的应用, 实际中可能是单独某种技术或部分组合方式。分散式供热技术中, 空气源热泵目前应用最为广泛, 光伏+地源热泵/空气源热泵目前也有试点应用, 各有优势和适宜范围, 分散式生物质供热就地取材、运行成本较低, 具有较大推广潜力, 需要研究制定相关标准; 区域集中供热技术中, 污水源热泵、中深层地热、工业余热、生物质锅炉、天然气冷热电联供系统等都具有广泛的应用, 实际推广过程中要结合资源、气候条件以及技术经济性, 选择合适的技术。德国的很多经验和案例也为中国清洁供热项目提供了很好的借鉴和示范, 比如光伏光热和热泵的结合、生物质能村/社区的模式、城市排水系统采用排污明渠热交换器满足供热需求的技术等。最后, 各种技术路线推进过程中, 经济性尤其是运行成本和可持续性是一个重要因素, 很多项目目前仍需要适当的支持政策。

有许多趋势会对本报告中讨论的典型可获得的供热技术的未来需求产生强烈的影响, 其中也包括第3章中讨论的另外20种技术, 例如如图 54中介绍的脱碳、减排等趋势:

- 技术的综合与集成(特别是与热泵和储热相结合);
- 领域耦合(如供热领域为电力领域提供灵活性, 特别是在可再生能源占比越来越高的情况下, 电力系统灵活性愈发重要)。向第五代区域供热系统转型为创新型供热技术的发展提供了巨大潜力;
- 低焓(如向更低温度区间的低温供热和热输送技术的转型);
- 最后, 数字化和自动化也为可持续供热技术在减少本地污染排放和碳排放之外开辟了更多途径。从中长期的角度看, 当电力行业近乎脱碳的时候, 这一潜力将进一步得到加强。

图54: 影响所选择供热技术的未来趋势



如图中所示, 建立在先前成功的可持续供热政策基础上的不同供热工具可以为技术的进一步推广铺平道路。

6. 图片列表

图 1: 德国2017年终端能源总消耗	9
图 2: 不同建筑物类型和类别的终端能源需求	9
图 3: 2018年供热领域不同能源载体终端能源需求	10
图 4: 德国建筑领域温室气体排放和2050年目标	10
图 5: 德国至2019年有效, 支持可持续供热的主要联邦政策工具	11
图 6: 颗粒排放优化的双膛火炉中的空气和烟气流动	15
图 7: 木材及其他固体燃料火炉的过滤器可以安装在烟囱内或者集成到火炉中	15
图 8: 私人家庭颗粒减排火炉示例	16
图 9: 现有生物质火炉改造	17
图 10: 电驱动热泵原理	18
图 11: 不同供热温度下性能系数与环境温度的函数关系	21
图 12: 德国空气源热泵的单位投资	22
图 13: 拉亨多夫 (Lachendorf) 义务消防队	23
图 14: 罗斯拉特 (Rösrath) 的多户住宅	23
图 15: 罗特 (Roth) 物流中心	24
图 16: 地源热泵不同供给温度下性能系数与环境温度的函数关系	27
图 17: 德国地源热泵的单位投资成本	29
图 18: 哈恩 (Haan) 的老旧泵站——一栋再利用的非住宅建筑内配有冰蓄冷设备的热泵	29
图 19: Freiberg Instruments公司总部——办公楼的空间供热和空间制冷	30
图 20: 日内瓦机场东翼楼——航站楼的大型地热热泵	30
图 21: 来自太阳辐射的有效的热能和电能以及光伏光热收集器 (PVT) 和热泵的原理图解	31
图 22: 光伏光热收集器的分类	33
图 23: 将光伏的过量热储存到地热埋管中	34
图 24: 排污明渠热交换器 (左) 和旁路热交换器 (右)	36
图 25: 废水余热利用系统原理	36
图 26: 汉堡 (Hamburg) 利希滕贝格 (Lichtenberg) 宜家 (IKEA) 的供热和制冷理念	37
图 27: 布雷滕 (Bretten) 的排污明渠热交换器	38
图 28: 内卡公园的排污明渠热交换器	38
图 29: 生物能村庄的物流流	41
图 30: 木屑锅炉在80个生物能村庄的装机容量 (kW)	42
图 31: 生物能社区的生物质设备与其他可再生能源技术的组合情况	42
图 32: 不同供热技术的具体温室气体排放	43
图 33: 布辛根生物能村	43
图 34: 兰德格区生物能村	44
图 35: 完全装配、自动填料的燃烧生物质锅炉的单位投资, 包括除灰、空气和烟气系统以及烟气清洁	44
图 36: 2009年中国净农作物残茬的空间分布 (100×100米) (Jiang等人 2012)	45

图 37: 砾坑季节性蓄热的原理	47
图 38: 布辛根 (Büdingen) 集热站的真空管集热器	47
图 39: 截至2019年8月德国已安装的大型太阳能集热站	48
图 40: 多宁隆德 (Dronninglund) 附近集热站的平板集热器	48
图 41: 多宁隆德一个具体太阳能集热站的投资成本细分 (总成本: 1460万欧元)	49
图 42: 森夫滕贝格附近集热站的真空管集热器	49
图 43: 地热能使用的不同类型 [13]	52
图 44: 慕尼黑深层地热设备	53
图 45: 德国具有高地热供热潜力的地区 (黄色)	55
图 46: 区域供热系统从使用化石燃料进化到使用灵活的多能可持续能源	59
图 47: 多尔恩斯泰因供热/制冷的销售价格和组成部分	61
图 48: 赫尔辛基基于热电联产 (CHP) 的区域供热/制冷 (DHC)	63
图 49: 余热利用技术	66
图 50: 余热回收示意图	66
图 51: 莱茵鲁尔 (Rail Rhein-Ruhr) 的区域供热	68
图 52: 卡尔斯鲁厄工业用地上的热交换器	68
图 53: 十种所介绍的可持续供热技术的综合评价	70
图 54: 影响所选择供热技术的未来趋势	71

7. 表格列表

表 1: 分布式可持续供热系统	12
表 2: 区域供热 (DH)	12
表 3: 大型集中供热 DH	13
表 4: 地源热泵的不同系统组件	20
表 5: 带光伏和生活热水电热器的空气源热泵的单位投资	22
表 6: 地源热泵的不同系统组件	26
表 7: 德国各地现有的地热区域供热厂 [4]	53
表 8: 安达赫治地热厂的技术和经济参数	56
表 9: 安达赫治地热定价范例	57
表 10: 区域供热高比例国家的区域供热特征 [1]	59
表 11: 赫滕区域供热系统未来可能的选择概述	62
表 12: 2017年 Helen Oy 的装机热生产容量以及赫尔辛基100%无化石燃料情景下的容量和能源	63

8. 参考资料

章节 2. 德国供热/制冷需求和政策框架

- [1] Federal Ministry of Economics and Technology, Energiedaten - nationale und internationale Entwicklung, (2019). <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten/gesamtausgabe.html> (accessed November 16, 2019).
- [2] H. Cischinsky, N. Diefenbach, M. Rodenfels, Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Anleitung zur Durchführung von Auswertungen mit der Auswertungsdatenbank, 2018.
- [3] J. Steinbach, D. Staniaszek, F. Anagnostopoulos, R. Lottes, L. Kranzl, A. Toleikyte, Die Sanierung des deutschen Gebäudebestandes - eine wirtschaftliche Bewertung aus Investorensicht, in: Energieeffizienz Gebäuden - Jahrb. 2016, VME - Verlag und Medienservice Energie Jürgen Pöschk, Berlin, 2016: pp. 77-86.
- [4] C. Sebi, S. Nadel, B. Schlomann, J. Steinbach, Policy strategies for achieving large long-term savings from retrofitting existing buildings, 2015 (2018).
- [5] Bürger, V., Klimaneutraler Gebäudebestand 2050: Herausforderungen an Politik und Infrastrukturentwicklung. Presentation on the BAFA Energietag 2019, 1.10.2019. Öko-Institut Freiburg.

章节4. 1 低排放的小型固体生物质炉具

- [1] BMWI: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, Energiedaten - nationale und internationale Entwicklung, (2019). <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten/gesamtausgabe.html> (accessed November 16, 2019)
- [2] Struschka, M., J. Goy, A. Gugelfuß (2017): Methodische Bewertung von Sekundärmaßnahmen für kleine Biomassefeuerungen(mit Messberichten zu den Teilprojekten I bis III und Kurzbericht zu ergänzenden Messungen IV. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK), Universität Stuttgart. Download http://fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/125865/U40-U84-N05-IFK-Bericht_mit_Anhaengen_07032018.pdf?command=downloadContent&filename=U40-U84-N05-IFK-Bericht_mit_Anhaengen_07032018.pdf
- [3] Fichtner et al. (2016): Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (Marktanreizprogramm) für den Zeitraum 2012 bis 2014, Fichtner, TFZ, Universität Kassel et al. Report commissioned by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Stuttgart
- [4] XEOOS, <https://www.xeoos.de/technik.html>

章节4. 2 加装光伏和热水器的空气源热泵系统

- [1] Volker Quaschnig: Erneuerbare Energien und Klimaschutz. Hintergründe, Techniken, Anlagenplanung, Wirtschaftlichkeit 2008.
- [2] Details. URL: <https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/bwp-marktzahlen-2018-nachhaltiges-wachstum-mit-luft-nach-oben-deutliches-signal-fuer-die-politik/#content>. Abrufdatum 19.09.2019.
- [3] Kosten einer Wärmepumpe (Preisvergleich). URL: <https://www.energieheld.de/heizung/waermepumpe/kosten>. Abrufdatum 24.09.2019.
- [4] Bundesverband Wärmepumpe (BWP). BWP-Datenbank -Freiwillige Feuerwehr La-chendorf. URL: https://www.waermepumpe.de/presse/referenzobjekte/bwp-daten-bank/?tx_refobjdb_house%5Bdetailid%5D=106&tx_refobjdb_house%5Baction%5D=show&tx_refobjdb_house%5Bcontroller%5D=House#content. Abrufdatum 25.09.2019.
- [5] Bundesverband Wärmepumpe (BWP). BWP-Datenbank - MFH Rösath. URL: https://www.waermepumpe.de/presse/referenzobjekte/bwp-daten-bank/?tx_refobjdb_house%5Bdetailid%5D=28&tx_refobjdb_house%5Baction%5D=show&tx_refobjdb_house%5Bcontroller%5D=House#content. Abrufdatum 26.09.2019.
- [6] Bundesverband Wärmepumpe (BWP). BWP-Datenbank - Roth Logistikzentrum. URL: https://www.waermepumpe.de/presse/referenzobjekte/bwp-daten-bank/?tx_refobjdb_house%5Bdetailid%5D=85&tx_refobjdb_house%5Baction%5D=show&tx_refobjdb_house%5Bcontroller%5D=House#content. Abrufdatum 25.09.2019.
- [7] BMWi (2015). Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt vom 11. März 2015. https://www.erneuerbare-ener-gien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Foerderbekanntmachungen/marktanreizprogramm-erneuerbare-energien.pdf?__blob=publicationFile&v=13
- [8] Energy Agency North Rhine Westfalia. Combination of heat pumps and photovoltaics (2015) [EnergieAgentur.NRW. Leitfaden Wärmepumpen – Kombination von Wärmepumpen und Photovoltaik.

章节 4. 3地源热泵 (GSHP)

- [1] Volker Quaschnig: Erneuerbare Energien und Klimaschutz. Hintergründe, Techniken, Anlagenplanung, Wirtschaftlichkeit 2008.

- [2] Bundesverband Wärmepumpe (BWP). Absatzzahlen für Heizungs- und Warmwasser-Wärmepumpen. 2018. <https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/bwp-marktzahlen-2018-nachhaltiges-wachstum-mit-luft-nach-oben-deutliches-signal-fuer-die-politik/#content>. Abrufdatum 19.09.2019.
- [3] Kosten einer Wärmepumpe (Preisvergleich). URL: <https://www.energieheld.de/heizung/waermepumpe/kosten>. Abrufdatum 24.09.2019.
- [4] Bundesverband Wärmepumpe (BWP). BWP-Datenbank - Alte Pumpstation. URL: https://www.waermepumpe.de/presse/referenzobjekte/bwp-datenbank/?tx_refobjdb_house%5Bdetailid%5D=60&tx_refobjdb_house%5Baction%5D=show&tx_refobjdb_house%5Bcontroller%5D=House#content. Abrufdatum 26.09.2019.
- [5] Bundesverband Wärmepumpe (BWP). BWP-Datenbank-Firmenzentrale Freiberg Instruments GmbH. URL: https://www.waermepumpe.de/presse/referenzobjekte/bwp-datenbank/?tx_refobjdb_house%5Bdetailid%5D=109&tx_refobjdb_house%5Baction%5D=show&tx_refobjdb_house%5Bcontroller%5D=House#content. Abrufdatum 26.09.2019.
- [6] Bundesverband Wärmepumpe (BWP).BWP-Datenbank- Östflügel Genfer Flughafen. URL: https://www.waermepumpe.de/presse/referenzobjekte/bwp-datenbank/?tx_refobjdb_house%5Bdetailid%5D=108&tx_refobjdb_house%5Baction%5D=show&tx_refobjdb_house%5Bcontroller%5D=House#content. Abrufdatum 26.09.2019.
- [7] BMWi (2015). Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt vom 11. März 2015. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Foerderbekanntmachungen/marktanreizprogramm-erneuerbare-energien.pdf?__blob=publicationFile&v=13
- [8] Bundesverband Wärmepumpe (BWP). Absatzzahlen für Heizungs- und Warmwasser-Wärmepumpen. 2018. <https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/bwp-marktzahlen-2018-nachhaltiges-wachstum-mit-luft-nach-oben-deutliches-signal-fuer-die-politik/#content>. Abrufdatum 19.09.2019.
- [9] OCHSNER Wärmepumpen: <https://www.ochsner.com/de-de/ochsner-produkte/waermepumpen-fuer-grosse-leistungen/>
- [10] VIESSMANN: <https://www.viessmann.de/de/gewerbe/waermepumpe/grosswaermepumpen/waermepumpen-bis-2-mw.html>

章节 4. 4带有热泵的光伏/光热集热器

- [1] Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, Energiedaten - nationale und internationale Entwicklung, (2019). <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten/gesamtausgabe.html> (accessed November 16, 2019).
- [2] H. Cischinsky, N. Diefenbach, M. Rodenfels, Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Anleitung zur Durchführung von Auswertungen mit der Auswertungsdatenbank, 2018.
- [3] J. Steinbach, D. Staniaszek, F. Anagnostopoulos, R. Lottes, L. Kranzl, A. Toleikyte, Die Sanierung des deutschen Gebäudebestandes - eine wirtschaftliche Bewertung aus Investorensicht, in: Energieeffizienz Gebäuden - Jahrb. 2016, VME - Verlag und Medienservice Energie Jürgen Pöschk, Berlin, 2016: pp. 77-86.
- [4] C. Sebi, S. Nadel, B. Schlomann, J. Steinbach, Policy strategies for achieving large long-term savings from retrofitting existing buildings, 2015 (2018).
- [5] BDH, Efficient systems and renewable energies, Federal Industrial Association of Germany, House, Energy and Environmental Technology, 2013.
- [6] DIN V 18599-5, Energy efficiency of buildings - Calculation of the net, final and primary energy demand for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting - Part 5: Final energy demand of heating systems, Dtsch. Inst. Für Normung (Hrsg.); Beuth Verlag, Berlin. (2011).
- [7] DESTATIS, Official statistic on buildings and flats [Fachserie 5 Reihe 3 - Gebäude und Wohnungen], Statistical Office Germany [Statistisches Bundesamt Deutschland], Wiesbaden, 2019.
- [8] A. Stuitable, D. Zech, H.-F. Wülbeck, E. Sperber, M. Nast, H. Hartmann, K. Reisinger, C. Budig, J. Orozaliev, F. Pag, K. Vajen, R. Erler, S. Janczik, M. Kaltschmitt, M. Niederberger, Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (Marktanreizprogramm) für den Zeitraum 2012 bis 2014. Evaluierung des Förderjahres 2014, 2016.
- [9] Fraunhofer ISE, Photovoltaics Report, 2019.
- [10] S. Portal, Kosten von Photovoltaikanlagen in 2019, Solaranlagen Portal. (2019). <https://www.solaranlagen-portal.de/photovoltaik/preis-solar-kosten.html#!> (accessed October 20, 2019).
- [11] B. Sanner, Ground Source Heat Pumps – history , development , current status , and future prospects, in: 12th IEA Heat Pump Conf., Rotterdam, The Netherlands, 2017.
- [12] M. Lämmle, THERMAL MANAGEMENT OF PVT COLLECTORS - Development and modelling of highly efficient glazed, flat plate PVT collectors with low-emissivity coatings and overheating protection, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), 2018.
- [13] U. Leibfried, A. Wagner, A. Abdul-zahra, SOLINK – PVT-Energieversorgungssystem für Wärmepumpen, Karlsruhe, Lörrach, 2017.
- [14] Consolar, SOLINK – Der Wärmepumpenkollektor Energiequelle für Wärmepumpen, 2017. <https://www.consolar.de/produkte/>

kollektorenmodule/waermepumpenkollektor_solink.html.

- [15] Consolar, PVT-Kollektor SOLINK, Consolar Solare Energiesysteme. (2018). https://www.consolar.de/produkte/kollektorenmodule/waermepumpenkollektor_solink.html (accessed November 3, 2019).
- [16] BMWi, BMU, The German government's Energy Concept - Long-term strategy for future energy supply, Berlin, 2010. http://www.bmu.de/english/energy_efficiency/doc/46516.php (accessed December 4, 2012).
- [17] Kesselheld, Hybridkollektoren: Arten, Vorteile, Funktionen & Kosten - Kesselheld, 2019. (n.d.). <https://www.kesselheld.de/hybridkollektoren/> (accessed November 3, 2019).
- [18] BINE, Solardächer doppelt nutzen - Hybrid-Kollektoren auf dem Dach liefern Strom, 2012. <http://www.bine.info/publikationen/publikation/solardaecher-doppelt-nutzen/>.

章节 4.5 污水热回收系统

- [1] AGFW | Effizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. (2017) Fernwärme - Preisübersicht (Stichtag: 01.10.2017).
- [2] Buri, R., und Kobel, B. (2004). Wärmenutzung aus Abwasser - Leitfaden für Inhaber, Betreiber und Planer von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisation. Leitfaden für Inhaber, Betreiber und Planer von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationen. Bern.
- [3] Butz, J. A., und Müller, E. A. (2010). Abwasserwärmenutzung – Erfahrungsbericht über Planung und Bau der Anlage in Bretten. Korrespondenz Abwasser, Abfall, 57(8), 765–770.
- [4] Kasag (2019): Utilization of waste water heat in the sewage canal, sewer, canalisation; Online available via: <https://www.kasag.com/en/renewable-energies-systems-plants-heat-exchanger-heat-from-wastewater/>; last Access: 17.09.2019
- [5] Christ, O., und Mitsdoerffer, R. (2008). Regenerative Energie nutzen - Wärmequelle Abwasser. WWT - Wasserwirtschaft Wassertechnik (05/2008): M6 - M12.
- [6] DWA 2009: Brune, P. et al.: (2009). Energie aus Abwasser - Wärme- und Lageenergie. Merkblatt DWA-M 114 - DWA Regelwerk. Hennef.
- [7] DBU 2005: Energie aus Abwasser - Leitfaden für Ingenieure und Planer. (2005). Bern/Osnabrück.
- [8] Uhrig (2019): References UHRIG Energy from waste water, Therm-Liner, state: 15.01.2019; Online available via: <https://www.uhrig-bau.eu/en/energy-from-wastewater/references-information/>; Last Access: 17.09.2019
- [9] Schitkowsky (2010): Wärmerückgewinnung aus Abwasser, Präsentation. Online available via: http://www.abwasserbilanz.de/wp-content/uploads/101213_schitkowsky.pdf; Last Access: 17.09.2019
- [10] Görres, J. (2015). Abwasserwärmenutzung. Präsentation Energiewendebauen, Online available via: https://projektinfos.energiewendebauen.de/fileadmin/user_upload/Neuigkeiten/2015/20150520_MeetingAachen/08_Goerres_Abwasserwaermenutzung_Stuttgart.pdf; Last Access: 17.09.2019
- [11] Christ, O., et al. (2010). Potenzial aus dem Kanal. Wärme aus Abwasser, IFAT 2010 SPECIAL
- [12] ifeu 2019: Fritz, S. and Pehnt, M. (2018): Kommunale Abwässer als Potenzial für die Wärmewende? Study on behalf of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety
- [13] FFE 2017: Einflüsse der Temperaturspreizung in Nahwärmenetzen. (2017), Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. Retrieved July 17, 2018 from <https://www.ffe.de/die-themen/speicher-und-netze/184-einfluesse-der-temperaturspreizung-in->; Last Access: 17.09.2019
- [14] badenova 2007: Hagspiel, B. (2007). Wärme aus Abwasser - Evaluation von Technik, Betrieb und Randbedingungen Potenzial der Kanalwärmenutzung in Freiburg im Breisgau. Freiburg im Breisgau.
- [15] Uhrig (2018): Wärmewende mit Energie aus Abwasser – Das unterschätzte Potential im Kanal; Online available via: https://www.thega.de/fileadmin/thega/pdf/thega-forum/2018/vortraege/session1/stephan_von_bothmer_uhrig_therm-liner_waermewende_mit_energie_aus_abwasser.pdf; Last Access: 17.09.2019
- [16] IKK Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung (201) - [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Energetische-Stadtsanierung/Finanzierungsangebote/Energieeffiziente-Quartiersversorgung-Kommunen-\(201\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Energetische-Stadtsanierung/Finanzierungsangebote/Energieeffiziente-Quartiersversorgung-Kommunen-(201)/)
- [17] Uhrig 2017: von Bothmer, C., und von Bothmer, S. (2017). Energie aus Abwasser: Turbo für die Wärmewende, Helmut UHRIG Straßen- und Tiefbau GmbH
- [18] Müller, E., Schmid, F., Kobel, B. (2005): Heizen und Kühlen mit Abwasser: Ratgeber für Bauträger und Kommunen; Deutsche Bundesstiftung Umwelt

章节 4.6 生物质能村庄/社区

- [1] C.A.R.M.E.N.: Website <https://www.carmen-ev.de/biogene-festbrennstoffe/biomasseheizwerke/wirtschaftlichkeit/474-waermegestehungskosten> (accessed on 05.11.2019)

- [2] Bioenergy communities in Germany: Website: <https://bioenergiesdorf.fnr.de/index.php?id=2116> (accessed on 05.11.2019)
- [3] Statista Website: <https://www.statista.com/statistics/278566/urban-and-rural-population-of-china/> (accessed on 05.11.2019)
- [4] Ruppert, H., Eigner-Thiel, S., Girschner, W., Karpenstein-Machan, M., Roland, F., Ruwisch, V., Sauer, B. & Schmuck, P. (2008). Wege zum Bioenergiesdorf. Leitfaden. Gülzow: Fachagentur Nachsende Rohstoffe.
- [5] Roland, F., Eigner-Thiel, S. (2016). 10 Jahre Bioenergiesdörfer-Ergebnisse einer Metaanalyse von 160 Bioenergiesdörfern und die Betrachtung von sozialen Aspekten bei der Umsetzung im Juni 2015
- [6] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2019). Bioenergy in Germany, Facts and figures 2019
- [7] Jiang, D., Zhuang, D., Fu, J., Huang, Y., Wen, K. (2012). Bioenergy potential from crop residues in China: Availability and distribution. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16

章节 4.7 大型太阳能集热站

- [1] Pehnt, M., Nast, M., et al. (2017): Wärmenetzsysteme 4.0. Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme „Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturwärmenetzen. Report commissioned by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, adelphi consult, PwC, Ecofys Germany. Download <https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/W%C3%A4rmenetze-4.0-Endbericht-final.pdf>.
- [2] Sandrock, M., T. Pauschinger (2019): Versorger und Stadtwerke entdecken die Solarthermie, ehp Magazin, 10/2019.

章节 4.8 地热区域供热

- [1] Sonnenseite: ökologische Kommunikation mit Franz Alt: <https://www.sonnenseite.com/de/energie/muenchen-baut-deutschlands-groesstes-geothermie-kraftwerk.html>
- [2] ITG Informationsportal Tiefe Geothermie: <https://www.tiefengeothermie.de/>
- [3] GEODH Geothermal District Heating: <http://geodh.eu/database/>
- [4] European Geothermal Congress 2019: Den Haag, The Netherlands, 11-14 June 2019: <http://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/CUR-12-Germany.pdf>
- [5] GeotIS 2019: (Geothermal Information System for Germany): Data on geothermal direct use and electricity, (2019), <http://www.geotis.de>.
- [6] Geothermie Unterhaching: https://www.geothermie-unterhaching.de/cms/geothermie/web.nsf/id/pa_daten_fakten.html
- [7] ITG Informationsportal Tiefe Geothermie: <https://www.tiefengeothermie.de/projekte/unterhaching>
- [8] Geothermie Unterhaching: [https://www.geothermie-unterhaching.de/cms/geothermie/web.nsf/gfx/6DE739FA51FA3FCFC125847F0046D42C/\\$file/Preisbeispiel%20Preisblatt%202019.pdf](https://www.geothermie-unterhaching.de/cms/geothermie/web.nsf/gfx/6DE739FA51FA3FCFC125847F0046D42C/$file/Preisbeispiel%20Preisblatt%202019.pdf)
- [9] SWM Stadtwerke München: <https://www.swm.de/english/company/renewable-energies.html>
- [10] Think Geoenergy: <http://www.thinkgeoenergy.com/fifth-well-successfully-drilled-for-munichs-geothermal-district-heating-network/>
- [11] IEA International Energy Agency: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/DistrictEnergySystemsInChina.pdf>
- [12] Think Geoenergy: <http://www.thinkgeoenergy.com/china-highlighting-the-tremendous-role-of-geothermal-heating-for-the-country/>
- [13] https://www.upgrade-dh.eu/images/Publications%20and%20Reports/D2.5_2019-07-02_Upgrade-DH_Handbook_EN.pdf

章节 4.9 带有燃气热电联产、热泵和季节性储热的集中供热/冷网

- [1] Euroheat, Country Profiles 2017 (<http://www.euroheat.org/knowledge-hub/country-profiles/>)
- [2] Euroheat & Power 2018: Top District Heating Countries – Euroheat & Power 2015 Survey Analysis. - <https://www.euroheat.org/news/district-energy-in-the-news/top-district-heating-countries-euroheat-power-2015-survey-analysis/>
- [3] Smart Energy Transition: http://smartenergytransition.fi/wp-content/uploads/2018/11/Clean-DHC-discussion-paper_SET_2018.pdf
- [4] 5th generation district heating and cooling systems. A review of existing cases in Europe (2019). In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 104, S. 504–522. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118308608/pdf?md5=fcc350261d0d1867058b714caca1c7e9&pid=1-s2.0-S1364032118308608-main.pdf>.
- [5] ifeu 2017: <https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/W%C3%A4rmenetze-4.0-Endbericht-final.pdf>

- [6] tft 2015: https://www.tftgmbh.de/fileadmin/user_upload/Wissen/PR_Text_Dollnstein.pdf
- [7] C.A.R.M.E.N.: <https://www.carmen-ev.de/biogene-festbrennstoffe/waermenetze/1966-waermenetze-neu-gedacht>
- [8] euroheat: <https://www.euroheat.org/wp-content/uploads/2016/04/Case-study-Helsinki-GDECA15.pdf>
- [9] euroheat: <https://www.euroheat.org/knowledge-hub/role-costs-large-scale-heat-pumps-decarbonising-existing-district-heating-networks/>
- [10] smart energy transition: http://smartenergytransition.fi/wp-content/uploads/2018/11/Clean-DHC-discussion-paper_SET_2018.pdf
- [11] Reuters: <https://uk.reuters.com/article/finland-energy-coal/finland-approves-ban-on-coal-for-energy-use-from-2029-idUKL5N20N6QV>
- [12] Euroheat: <https://www.euroheat.org/wp-content/uploads/2016/04/Case-study-Helsinki-GDECA15.pdf>
- [13] International Energy Agency: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/DistrictEnergySystemsInChina.pdf>
- [14] https://www.upgrade-dh.eu/images/Publications%2520and%2520Reports/D2.5_2019-07-02_Upgrade-DH_Handbook_EN.pdf
- [15] Popovski, Eftim et al (2019): The role and costs of large-scale heat pumps in decarbonising existing district heating networks – A case study for the city of Herten in Germany. In: Energy 180, S. 918–933. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.122.

章节 4.10 工业余热回收

- [1] Pehnt 2010: Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch: Springer-Verlag.
- [2] Viklund 2014: Technologies for utilization of industrial excess heat. Potentials for energy recovery and CO2 emission reduction. In: Energy Conversion and Management 77, S. 369–379.
- [3] Pehnt 2010: Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung, Bericht im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“ https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Nut-zung_industrieller_Abwaerme.pdf
- [4] Schaefer 1995: Energiewirtschaftliche Bedeutung der Nutzung von Abfallenergie. In: Fratzscher, W.; Stephan, K. (Hrsg.): Abfallenergienutzung. Technische, wirtschaftliche und soziale Aspekte. Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Optionen zukünftiger industrieller Produktionssysteme. Berlin: Akademie, S. 42–60.
- [5] Bloemer 2019: EnEff:Wärme -netzgebundene Nutzung industrieller Abwärme (NENIA), Kombinierte räumlich-zeitliche Modellierung von Wärmebedarf und Abwärmeangebot in Deutschland, Schlussbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie
- [6] LfU-Bayern 2008: Leitfaden zur Abwärmenutzung in Kommunen. Augsburg. Online: https://www.gfm-ingenieure.de/fileadmin/Daten/Aktuelles/leitfaden_abwaermenutzung.pdf
- [7] Hirzel 2013: Industrielle Abwärmenutzung, Kurzstudie im Rahmen des Begleitforschungsprojekts Effizienzfabrik - Innovationsplattform Ressourceneffizienz in der Produktion https://www.effizienzfabrik.de/ecomaXL/files/Kurzstudie_Abwaermenutzung.pdf&download=1
- [8] Popovski 2018: Technical and economic feasibility of sustainable heating and cooling supply options in southern European municipalities-A case study for Matosinhos, Portugal. Energy, 153, 311-323.
- [9] Rink 2013: Nutzung industrieller Abwärme durch die Stadtwerke Karlsruhe zur Wärmeversorgung der Stadt Karlsruhe, Investitionen zur Verminderung von Umweltbelastungen Programm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Abschlussbericht 70441 – 1/13 https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/2019-09/1514-stadtwer-ke_karls-ruhe_gmbh.pdf
- [9] Fritz 2019: Don't waste the water, use wastewater - excess heat distribution for private households through sewer networks, European Council for an Energy-Efficient Economy -ECEEE-, Stockholm: eceee Summer Study 2019. Proceedings
- [10] Ivner 2015: Effect of the use of industrial excess heat in district heating on greenhouse gas emissions: A systems perspective. Resources, Conservation and Recycling, 100, 81-87.
- [11] Bergmeier 2013: The history of waste energy recovery in Germany since 1920. Energy, 28(13), 1359-1374.
- [12] Hirzel 2019: Evaluierung und Weiterentwicklung des Energieeffizienzfonds (Projekt Nr. 63/15) im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)
- [13] Doračić 2018: Evaluation of Excess Heat Utilization in District Heating Systems by Implementing Levelized Cost of Excess Heat. Energies, 11(3), 575.

网站



微信

