



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

德国农业光伏指南： 农业与能源转型的机遇



版本说明

《德国农业光伏指南：农业与能源转型的机遇》由德国弗劳恩霍夫太阳能系统研究所编写，全面梳理了德国农业光伏的发展现状、商业模式、典型项目及政策框架，并为农民、市政当局和项目开发方提供了实用建议。本中文版本经德国弗劳恩霍夫太阳能系统研究所授权，由 GIZ 在中德能源与能效合作伙伴框架下翻译并发布。德国弗劳恩霍夫太阳能系统研究所不对翻译内容的准确性或完整性承担责任。中德能源与能效合作伙伴受德国联邦经济和气候保护部（BMWK）委托和资助，中国国家发展和改革委员会、国家能源局作为中方政府合作伙伴提供支持和指导。项目旨在围绕能效提升和发展可再生能源，通过深入交流可持续能源系统发展相关的政策、最佳实践和技术知识，推动高级别政府对话，企业与政府交流以及技术和政策法规层面交流，从而促进和推动两国能源转型，助力实现气候目标。

编写单位

弗劳恩霍夫太阳能系统研究所（ISE）
地址：Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg（弗莱堡市）
电话：+49 761 4588-0 www.ise.fraunhofer.de

作者介绍

Max Trommsdorff（弗劳恩霍夫太阳能系统研究所）；
Simon Gruber（弗劳恩霍夫太阳能系统研究所）；
Tobias Keinath（弗劳恩霍夫太阳能系统研究所）；
Michaela Hopf（弗劳恩霍夫太阳能系统研究所）；
Charis Hermann（弗劳恩霍夫太阳能系统研究所）
Frederik Schönberger（弗劳恩霍夫太阳能系统研究所）
Petra Högy 教授、博士（霍恩海姆大学编外教授）；
Sabine Zikeli 博士（霍恩海姆大学）；
Andrea Ehmann（霍恩海姆大学）；
Axel Weselek（霍恩海姆大学）；
Ulrich Bodmer 博士、教授（魏恩斯特潘 - 特里斯多夫应用技术大学）；
Christine Rösch 博士（卡尔斯鲁厄理工学院）；
Daniel Ketzner 博士（卡尔斯鲁厄理工学院）；
Nora Weinberger（卡尔斯鲁厄理工学院）；
Stephan Schindele（BayWa r.e.）
Jens Vollprecht，律师，林业学硕士（Becker Büttner Held 律师事务所（BBH））。

中文版发布方

德国国际合作机构（GIZ）
注册办公室：德国波恩、埃施波恩
项目：中德能源与能效合作伙伴
受德国联邦经济和气候保护部（BMWK）委托
北京市朝阳区亮马河南路 14 号
塔园外交办公楼 1-15
邮编：100600
项目负责人：尹玉霞
邮箱：energy-china@giz.de
网站：www.energypartnership.cn
www.giz.de/china
电话：+86 10 8527 5589

翻译及校对

吕亚南、王昊、任心语、陈蓝，德国国际合作机构

© 北京，2024 年 12 月

实施机构

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

项目委托方

 Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action

前言



亲爱的读者们：

植物需要阳光，光伏系统亦是如此。众所周知：为了实现气候目标，我们必须加快扩建可再生能源，将太阳能发电量提高至当前的六到八倍。屋顶光伏和地面光伏的扩建势在必行。在过去，这是一个非此即彼的问题：究竟选择农业还是可再生能源？如今，技术创新帮我们解决了这一两难问题。农业光伏技术提供了颇有发展前景的解决方案。农田上的太阳能电池负责发电，而光伏电池下的谷物、蔬菜和水果则能继续茁壮成长。土地实现了双重利用。这项技术不仅在不占用宝贵农业用地的前提下提高了光伏发电的产能，还为农场开辟了新的收入来源，增强了农场的抗风险能力。

气候危机带来的负面影响多年来一直困扰着农户。几乎没有哪个行业像农业一样受到日益频繁的极端气候影响的冲击。干旱、炎热以及突如其来的冰雹，都威胁着农业生产。这正是光伏系统大显身手的地方。光伏设备的遮阳功能不仅可以减少强光和干旱对作物的影响，还能减缓冰雹的冲击，保护作物。已有研究证明了这些积极作用的有效性。

本指南将介绍迄今为止的科学研究与实践成果，并基于当前发展现状，揭示农业光伏技术孕育的机会。

德国政府将通过改进补贴制度来支持农业光伏的发展。在今年四月的创新性招标中，德国将首次依据《可再生能源法》为农业光伏系统提供上网电价补贴。此外，修订后的《共同农业政策直接补贴条例》也纳入新的政策，规定安装了农业光伏系统的企业仍能获得 85% 的农业用地补贴。

尽管这项新技术背后的许多根本性问题已经得到解决，但仍旧有些技术性问题有待探索：例如，农业光伏系统能否与浆果等特殊作物的种植巧妙结合？是否存在针对温室大棚的适配方案？

其他国家也认识到了农业光伏的潜力，尤其是一些亚洲国家，将土地同时用于农业和光伏已经成为了当地的特色景观。欧洲，尤其是法国，正在积极推动该技术的发展。我们同样对农业光伏等创新技术充满信心，因为其背后的理念既简单又令人信服：农田依旧是农田。光伏系统架设在农田之上，为人类明日之生计提供了保障。因此，德国政府致力于推动农业、气候与生态保护三赢的局面。希望大家对农业光伏的未来也充满信心！

贝蒂娜·斯塔克 - 瓦辛格 (Bettina Stark-Watzinger)
德国联邦议院议员
德国联邦教育与研究部部长
照片：© 德国联邦政府 / Guido Bergmann

杰姆·厄兹德米尔 (Cem Özdemir)
德国联邦议院议员
德国联邦食品与农业部部长
照片：© 德国联邦食品与农业部 / Janine Schmitz / Phototek

目录

1 农业光伏助力实现资源节约型的土地利用	1
2 农业光伏的发展现状	5
2.1 农业光伏：旨在化解用地竞争的新方案	5
2.2 降水和光照	6
2.3 农业光伏的定义和潜力	6
2.4 德国的研究设施	10
2.5 德国的私营光伏基地	15
2.6 德国的研究项目	17
2.7 国际发展	19
3 农业	22
3.1 APV-RESOLA 研究成果	23
3.2 农业耕作与作物选择	24
3.3 农场主的反馈	28
4 经济性与商业模式	30
4.1 投资成本	30
4.2 运营成本	31
4.3 发电成本	32
4.4 发电自用和电力收入	32
4.5 商业模式	33
5 技术	35
5.1 农业光伏设施的结构设计方案	36
5.2 光伏组件技术	37
5.3 支撑结构和地基	38
5.4 光照管理	40
5.5 水管理	41
5.6 光伏系统的规模	41
5.7 批准、安装和运营	42

6 社会	45
6.1 公民和相关利益群体的参与	45
6.2 特定背景下的社会接受度	45
6.3 对话与公民参与的两个案例	46
6.4 成功因素	47
7 政策与法律	49
7.1 共同农业政策直接支付条例	49
7.2 公共建筑法的要求	50
7.3 遗产税、赠与税、土地税和财产转让税	51
7.4 《可再生能源法》（EEG 2023）	51
8 推进农业光伏的发展	56
9 文献和资料来源	58
9.1 资料来源	58
9.2 图片目录	60
9.3 表格目录	62
9.4 缩略语	62
9.5 相关文献链接	62

1 农业光伏助力实现资源节约型的土地利用

世界人口持续增长,对粮食的需求也随之增大。与此同时,为应对气候危机,建设地面光伏设施(PV-FFA)也迫切需要用地 [1]。特别是在人口稠密地区,争夺可用土地的竞争愈演愈烈。

地面光伏的土地需求日益增加,这是因为此类光伏设施的成本持续下降,经济效益逐步提高,即便不依靠国家补贴也能够实现盈利。同时,气候危机对农业造成的负面影响也在与日俱增:包括水资源稀缺、极端天气和全球变暖,因此,我们必须采取新的措施来保护植物和土壤免受环境的影响。当前法律框架和经济上的不确定性令农业企业在许多方面倍感压力。一方面,物种和水资源保护迫在眉睫,另一方面,农作物收成必须实现增产并稳定产量。

农业用地的双重利用

农业光伏(Agri-PV)通过对土地的双重利用缓解了用地竞争:建造大型光伏设施的同时还可以将土地用于农业生产。一些地区既有适宜农业生产的肥沃的土壤和温和的气候,又因充沛的光照是建设光伏设施的理想之地。对于这些地区,土地在农业和光伏产业上的双重利用能带来巨大的收益。

太阳能与风能将成为未来能源供给系统最为重要的支柱,因此,将光伏发电融入生活的不同领域已迫在眉睫。根据弗劳恩霍夫太阳能系统研究所的估算,到2045年,只有将德国的光伏装机容量增加六到八倍,才能实现气候中和 [2]。



图 1: 康斯坦茨博登湖畔的农业光伏研究设施
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

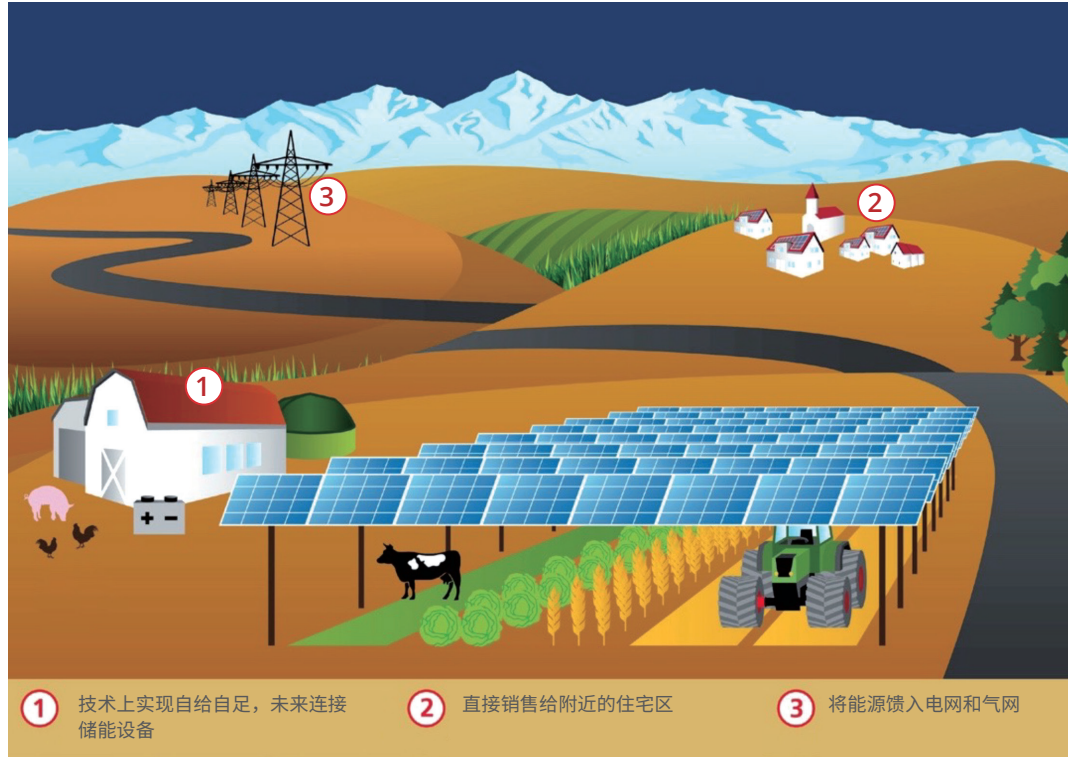


图 2：农业光伏系统的插图
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

弗劳恩霍夫太阳能系统研究所的创建人阿道夫·戈茨伯格 (Adolf Goetzberger) 教授和阿明·扎斯特罗 (Armin Zastrow) 博士早在 1981 年就在《太阳能》(Sonnenergie) 杂志上发表了《太阳能集热器下的土豆》(Kartoffeln unter dem Kollektor) 一文，率先提出了这种土地双重利用的形式 [3]。2014 年，创新小组 APV-RESOLA (“农业光伏：对资源节约型土地利用的贡献” (Agrophotovoltaik: Beitrag zur ressourceneffizienten Landnutzung)) 开始研究这个概念，并提出了更多研究问题。德国联邦教育和研究部 (BMBF) 在“可持续发展研究”计划 FONA 的框架下为该项目提供财政资助。博登湖畔黑格尔巴赫 (Heggelbach) 的农业光伏试点项目从经济、技术、社会和生态方面对现实条件下的农业光伏技术进行了科学考量，以证明农业光伏技术的可行性。

项目的参与机构包括弗劳恩霍夫太阳能系统研究所 (负责管理和协调)、霍恩海姆大学 (Universität Hohenheim)、卡尔斯鲁厄理工学院 (KIT) 的技术评估和系统分析研究所 (ITAS) [4]、BayWa r.e. 太阳能项目有限公司、博登湖-上施瓦本地区联合会 (Regionalverband Bodensee-Oberschwaben)、舍瑙电厂 (Elektrizitätswerke Schönau) 和黑格尔巴赫农场社区。

黑格尔巴赫的光伏电站共拥有 720 个双面光伏组件，装机容量为 194kWp，坐落于三分之一公顷的农田上，净空高度为 5 米。2017 年和 2018 年的土地利用效率分别增加了 60% 至 86%，干旱期的农田适应性也得到了显著改善。目前，该设施正用于进一步的研究项目。



图 3：APV-RESOLA 的项目合作伙伴

历史回顾

近年来，农业光伏技术的发展十分迅猛，几乎推广到了世界的各个角落。装机容量从 2012 年的约 5MWp 猛增至 2021 年的至少 14GWp。这样的爆炸式增长主要得益于日本（自 2013 年起）、中国（2014 年左右）、法国（自 2017 年起）、美国（自 2018 年起）和近期韩国 [5] 政府出台的扶持计划。

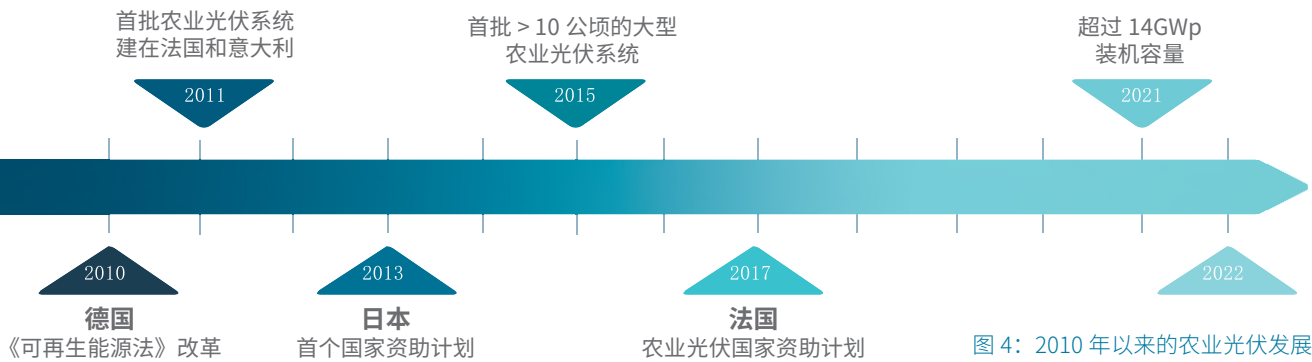


图 4：2010 年以来的农业光伏发展
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

农业光伏孕育的机会

APV-RESOLA 项目已经证实，农业光伏不仅能够提高土地利用效率，若技术设计得当，还能改善作物适应性并提高农业收成。光伏组件能部分遮挡保护作物 [6]，因此，受冰雹、霜冻和干旱影响的水果及特殊作物也能从中获益。

光伏与农业之间存在进一步的协同潜力，主要包括：

- 可减少高达 20% 的灌溉需求 [7]；
- 收集雨水用于灌溉；
- 有可能减少风蚀影响；
- 利用光伏支撑结构来安装防雹网或保护膜；
- 优化农作物的光照，例如借助光伏跟踪系统；
- 更好的对流冷却可提高太阳能组件的效率；

距离地面和相邻组件阵列较远，双面的太阳能组件可利用两面来光伏发电，组件的效率因此更高。

此外，农业光伏发电也能满足企业自身分布式的用能需求，减少从电网购电，降低用电支出。农业企业也可以销售自发电，作为另一大收入来源。

挑战：实施中的障碍

尽管农业光伏的技术和经济可行性已经在许多国家得到了验证，但德国普及农业光伏仍然面对着重重障碍。根据当前的立法，德国尚未明确办理建筑许可证的必要步骤德国法律框架的详细信息参见章节 7.1。

在一些地区，社会接受度是农业光伏发展面对的另一项挑战。应尽早邀请农业光伏设施规划用地所在地区的公民及利益群体参与进来，这是最为重要的工作之一，我们将在第 6 章里具体讨论这一行动领域。

为了彰显各类农业光伏方案可能形成的协同作用，充分地阐明社会接受度的问题，有必要出台资助计划，促进市场发展，积极推动开展进一步的研究项目。只有这样，我们才能深入研究生态和经济方面的机遇和风险，以及非技术与社会维度上的成功因素。同时，这也将势必增强投资方、公民和商业企业的投资意愿和创造力，制定相应的解决方案。章节 7.2 阐述了其他政策行动领域的情况。

农业光伏一览

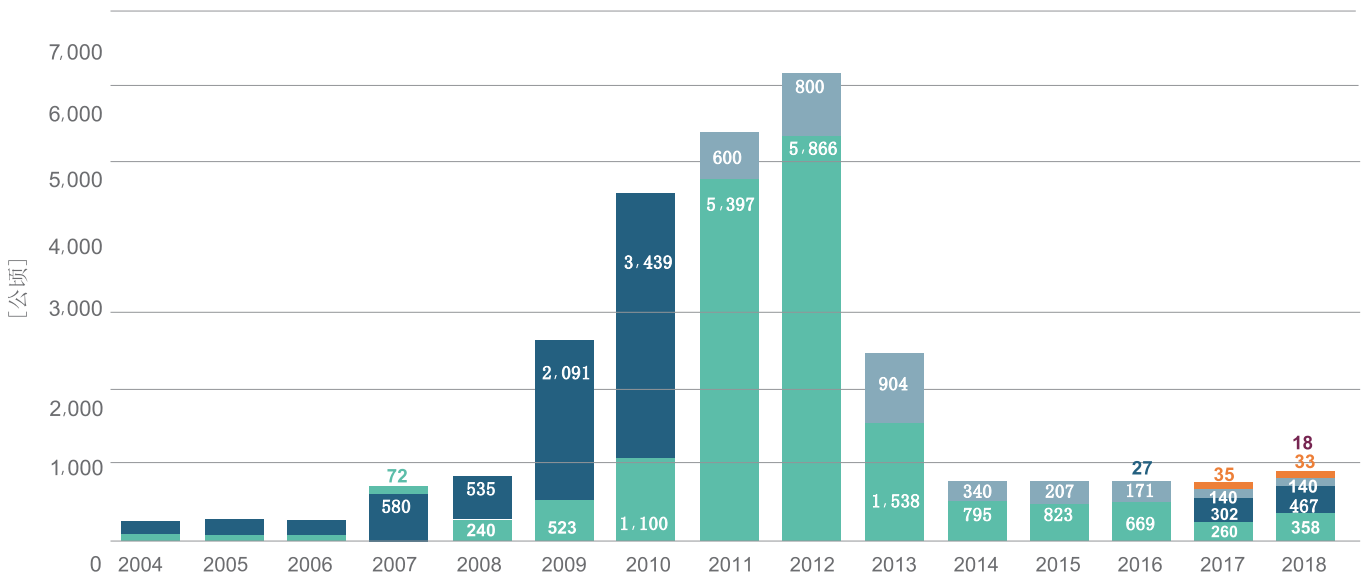
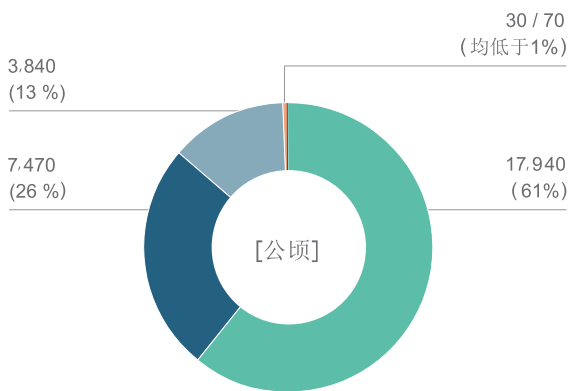
- 全球装机容量至少为 14GWp；
- 在德国仅高架农业光伏的潜力估计就可达 1700GWp 装机容量。

优势所在

- 地面光伏设施与农业的协调发展；
- 可在农业方面产生额外的积极效益，包括加强农作物抵御冰雹、霜冻和干旱的能力，为其提供保护；
- 与小型屋顶光伏系统相比，均化能源成本更低；
- 农业收入的多样化。

项目开发的必要步骤

- 用地规划：在用地规划中将农业光伏系统归于“农业光伏特殊地区”，而非“电力生产企业 / 商业场所”，避免将这类农业光伏用地定义为不透水土地；
- 将农业光伏的土地覆盖范围普遍扩大到德国《可再生能源法》框架内的所有农业用地；
- 对无需招标的小型高架农业光伏系统 (< 1 MWp) 实行德国《可再生能源法》法定的上网电价补贴（基于标准）；
- 为必须招标的大型高架农业光伏系统 (> 1 MWp) 另外开辟一个专门的招标业务单元（基于标准）；
- 享受德国《联邦建筑法》(BauGB) 规定的部分优先权：将园艺光伏设施和 1MWp 以下的小型设施作为《联邦建筑法》第 35 条规定的优先权项目，简化审批程序；
- 实施一项德国的研究发展计划；
- 尽早让利益群体和公民广泛参与进来，分析建设农业光伏设施的非技术性成功因素，确定合适的地点。



- 改造, 其他建筑
- 耕地, 自 2016 年起, 贫瘠地区
- 德国联邦房地产管理局 (BImA)
- 交通用地
- 其他

图 5：2004 年以来德国地面光伏设施的用地情况，既有设施总量和每年新增量 © 德国联邦经济和气候保护部 [8]

2 农业光伏的发展现状

光伏和风电是未来能源供应最为重要的支柱。2009 年到 2019 年期间，光伏组件的价格下降了约 90%。当前的发电成本，根据光伏系统的规模不同，约为每度 4 至 11 欧分。

民众对光伏发电的接受度比较高，且光伏能集成到人类生活环境的各个空间领域中，例如楼宇外立面或屋顶、海洋湖泊或交通用地等地方。农业光伏实现了土地的双重利用，光伏和光合作用彼此之间不再是竞争关系，而是很好的互补。

截止 2021 年底，德国的光伏装机容量约为 59GWp，其中约 75% 为屋顶光伏，其余为地面光伏设施 [9]。即使如此，光伏设施仍需扩建：弗劳恩霍夫太阳能系统研究所计算得出，到 2045 年的装机容量需求为 300 到 450GWp。若能将光伏技术整合到建筑物、车辆和道路上，并将其用在农业用地和水面区域及城镇空间内，我们便可以开辟出大面积的发电设施用地。

技术潜力的经济和实际可行性，取决于一系列经济和监管框架条件。原则上，相较于简单的大规模地面光伏电站，集成式光伏发电成本预计更高一些。但集成式光伏设施有助于减少用地竞争，并能创造协同效应。例如，光伏系统可以取代建筑幕墙，能利用防噪声墙的支撑结构，提高电动汽车的续航能力，也能使农业用地得到双重利用。此处遵循的原则是：光伏层面的额外收益越大，集成式设施得以实施的成功率就越高。



图 6: 光伏综合应用
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

2.1 农业光伏：旨在化解用地竞争的新方案

农业光伏是化解用地竞争的新方案。此外，农业光伏领域的研究开发也是德国联邦教育与研究部（BMBF）《2025 年高科技战略》要求的一项重要工作。



图 7: 传统的地面光伏设施 © 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

2.2 降水和光照

德国 1880 年以来的长期测量结果显示，全国降水量平均每年增加 8%。尽管如此，过去三十年的降水量呈明显的下降趋势。德国联邦气象局 (DWD) [10] 的数据表明，自 1991 年以来，德国每年的降水量下降幅度为 0.39%。平均降水量较参考年份减少了近百分之十二 (见图 8，蓝色趋势线)。特别是春天的气候条件发生了根本性的变化，而春季气候对许多植物的生长至关重要。过去十二年里，四月降水量比往

年四月的平均值都要低，有些年份甚至低于平均值 70%。因初春温暖，年初时期的土壤水分便已匮乏，夏天也无法补足土壤中所缺乏的水分 [11]。此外，数据分析显示，同期的全球总辐射量 (即太阳直接辐射和漫射辐射的总和) 每年增加 0.28% (橙色趋势线)，这一变化有利于提高光伏的发电产出。降水量逐步减少，全球总辐射量不断上升的趋势让农业光伏不但能提高农业系统面对气候危机时的韧性，并从这一系列的影响及变化中获益。

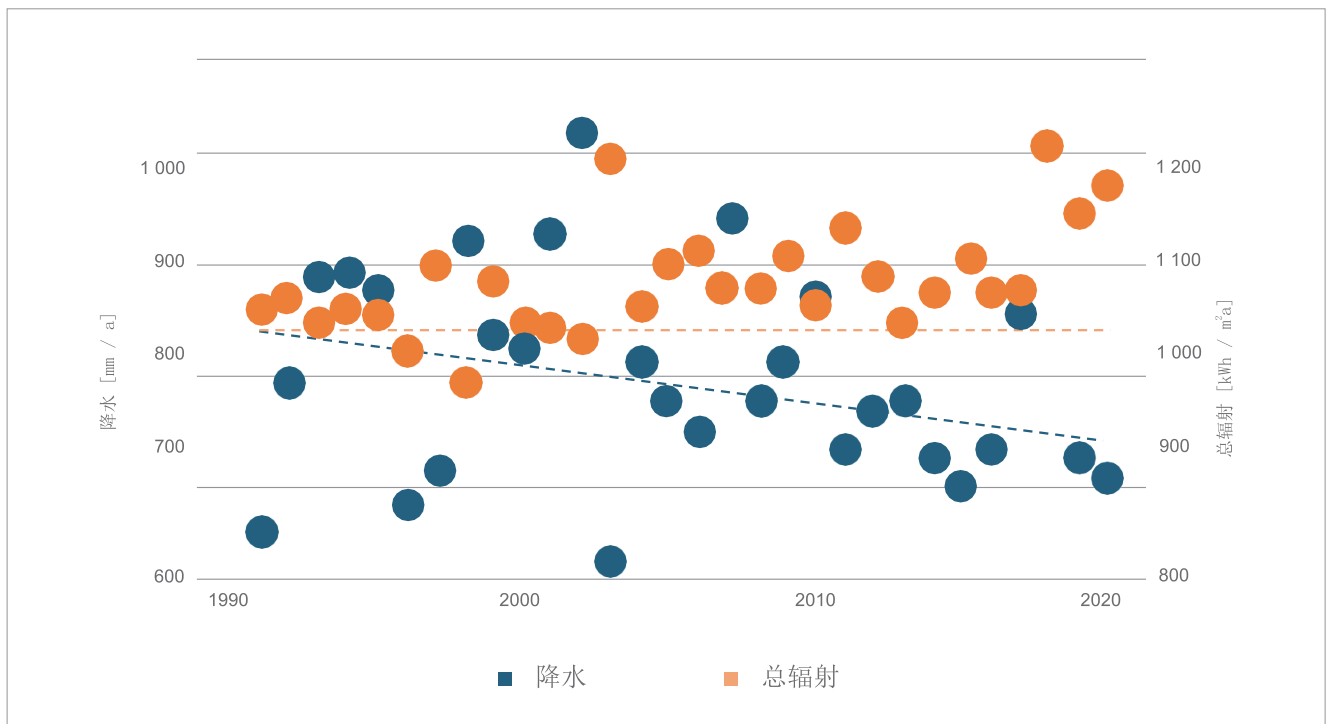


图 8：1991 年以来德国的降水和总辐射量的变化情况
数据：德国联邦气象局，弗劳恩霍夫太阳能系统研究所绘图

2.3 农业光伏的定义和潜力

农业光伏指利用土地同时进行农业耕种和光伏发电的技术 [12]。利用这项技术，土地不仅可用于农作物生产 (光合作用)，也能用于太阳能发电 (光伏)。在某些情况下，带有光伏模块的牲畜棚也被视为农业光伏，但它们较于普通的屋顶光伏缺乏明显的区别性特征。

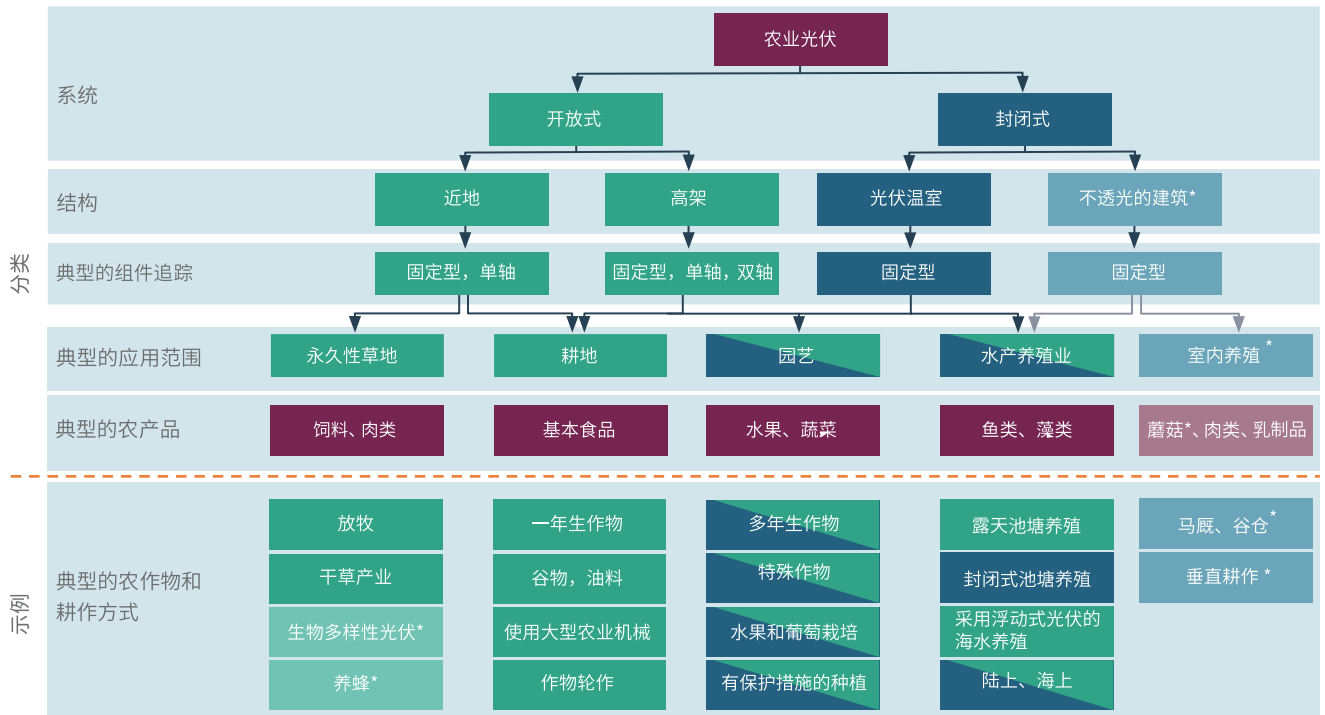
将光伏集成于农业的技术方案非常多样，与农业本身一样具有多样性。我们可以粗略地将其分为开放和封闭系统 (见图 9)。封闭系统基本上指光伏温室。开放式农业光伏系统

可进一步细分为近地设施和高架农业光伏设施。高架农业光伏的光伏组件位于距离地面至少 2.1 米的高度 (见下文关于 DIN SPEC 91434 的内容)。上述情况中，人们在光伏组件下从事农业耕种。若采用近地系统，人们通常在光伏组件之间的区域从事农业生产。

近地光伏设施的优势主要在于其成本较低，对景观的影响较小。农业光伏系统能更有效地利用土地面积，提高对农作物的保护，使其免受负面的环境影响。

与地面光伏设施类似，高架农业光伏系统可由刚性支撑结构以及单轴或双轴可移动结构（所谓的跟踪器）构成。带有移动系统的光伏组件可按照需要调整朝向，以实现更为灵活的光照管理。

本指南主要聚焦耕地 (> 2 米) 和园艺 (约 2.5 米) 使用的农业光伏系统，包括蔬菜、水果和葡萄树等特殊作物的应用场景。指南用较小篇幅介绍了近地系统在永久性草地上的应用情况。文中用例所给出的高度数值仅代表其高度上限，并从技术经济的角度界定了不同的用例适用范围。指南中不涉及光伏温室这类封闭系统。不同技术方案的详细信息可参见章节 5.1。



* 非严格意义上的农业光伏应用场景

图 9：农业光伏系统的分类
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

DIN SPEC 91434 《农业光伏系统——对首先考虑农业用途的光伏系统的要求》摘要

弗劳恩霍夫太阳能系统研究所与霍恩海姆大学联合一个由科学和实践合作伙伴组成的联合体以及德国标准化学会 (DIN)，共同制定了德国标准化学会规范 DIN SPEC 91434。DIN SPEC 规范要求农业光伏所在土地主要为农用，由此明确了农业光伏设施与传统地面光伏设施之间的区别。这似乎也是该技术成功进入市场的必要前提条件。因为 DIN SPEC 为立法者和补贴提供方以及审批机构提供了审核的依据，并定义了农业光伏设施建设和运行方面的质量标准。此外，德国将在 DIN SPEC 的基础上进一步制定农业光伏设施的检测程序和认证方案。

负责制定 DIN SPEC 标准的联合体包含了 15 家机构，其中大部分来自光伏部门。DIN SPEC 的规范主要针对农业领域。这是因为当前已有一系列相关的光伏技术标准，并且这些标准也适用于农业光伏。表 01 列示了 DIN SPEC 规范最重要的内容及其对农业光伏设施的分类。

不论哪种类别的农业光伏设施，其所占土地必须继续用于农业用途。农业用地方案须更为具体地描述相应用地的农业用途。

农业用地方案须满足以下核心要求与标准：

- 必须保证该地块延续此前的农业可用性，并在农业用地方案中规定计划的土地使用形式。
- 对于第一类农业光伏设施而言，因安装光伏设施而导致的用地损失面积不得超过总项目用地面积的 10%，在第二类设施中不得超过 15%。
- 必须检验光照充足与否、是否均匀，并确定水源的可用性，按照农产品的需要进行调整。
- 此外，须防止因光伏设施建设、地面固定或光伏组件流水而造成对土壤的侵蚀或损害。
- 还须确保农业光伏设施建成后的农业产量至少达到参考产量的 66%。参考产量指的是同一片农业用地的三年平均产量或出版物提供的可比数据。

除了上述核心参数及要求外，DIN SPEC 标准还包含了就农业光伏设施规划与安装的进一步建议。DIN SPEC 规范的文件可通过以下链接免费下载：<https://www.din.de/de/din-und-seine-partner/press/news/up-current-down-gemues-797786>。

表 01：DIN SPEC 91434 规定的类别与应用形式概述

农业光伏系统	应用	示例
第一类： 距地面高度 > 2.1 m 在农业光伏设施下从事农耕 (图 1)	1A: 永久及多年生作物	水果种植、浆果种植、葡萄种植、啤酒花
	1B: 一年生和多年生作物	耕地作物、蔬菜作物、轮换放牧的草场、耕地草料
	1C: 用于砍伐的永久割草地	密集的经营类牧场，粗放使用的牧场
	1D: 用于放牧的永久割草地	长期牧场，轮牧（例如牛、家禽、羊、猪和山羊）
第二类： 近地面，距地面高度 < 2.1 m 在农业光伏太阳能电池阵列之间从事农耕 (图 2/3)	2A: 永久作物和多年生作物	水果种植、浆果种植、葡萄种植、啤酒花
	2B: 一年生和多年生作物	耕地作物、蔬菜作物、轮换放牧的牧场、耕地饲料
	2C: 用于砍伐的永久性草地	密集的经营类牧场，粗放使用的牧场
	2D: 用于放牧的永久性草地	轮流放牧，轮牧（例如牛、家禽、羊、猪和山羊）

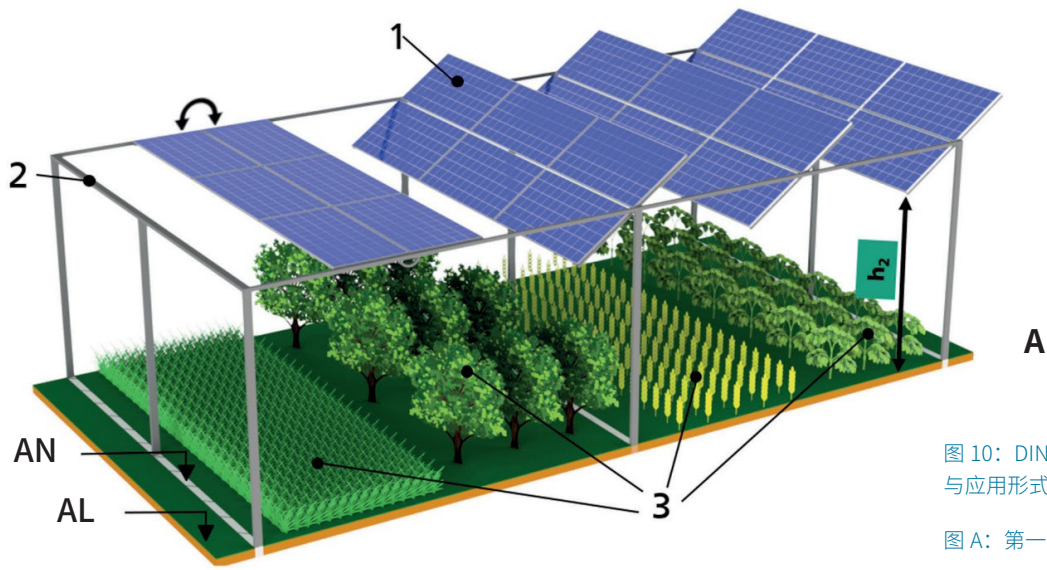
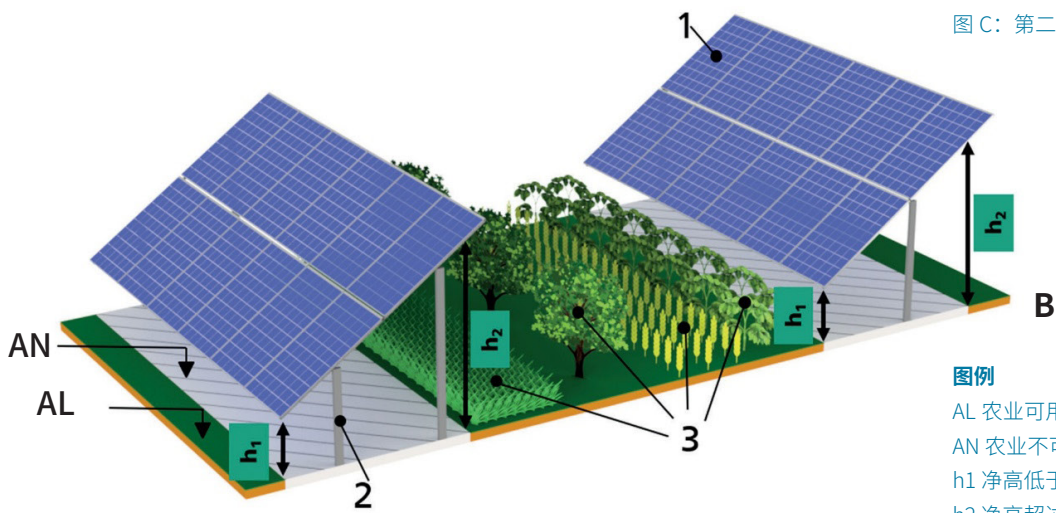


图 10: DIN SPEC 91434 规定的农业光伏类别与应用形式图示

图 A: 第一类农业光伏的图示

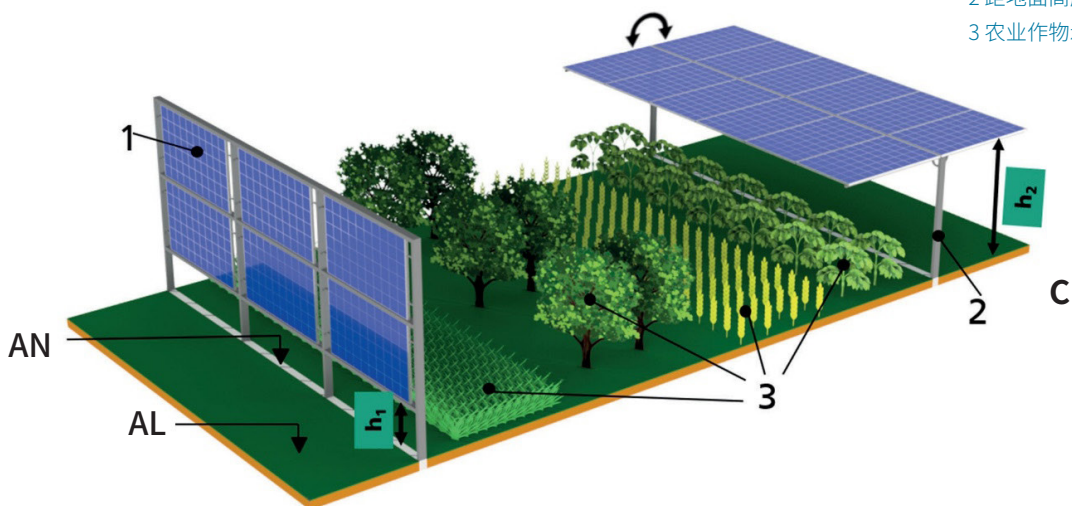
图 B: 第二类农业光伏的图示, 变体 1

图 C: 第二类农业光伏的图示, 变体 1 和 2



图例

- AL 农业可用面积
- AN 农业不可用的土地面积
- h1 净高低于 2.10 米
- h2 净高超过 2.10 米
- 1 光伏组件光伏组件的示例
- 2 距地面高度
- 3 农业作物示例



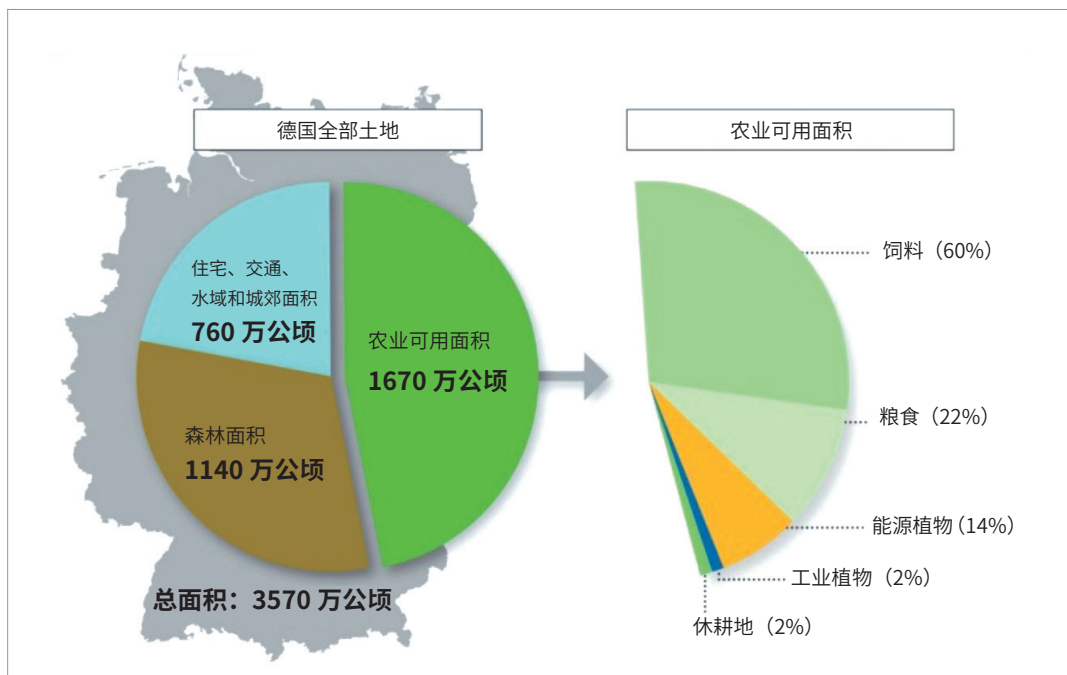


图 11: 德国的土地使用情况 © 可再生原材料专业机构 (2019) [13]

德国农业光伏潜力

在所有综合光伏应用中，农业光伏孕育着巨大的机会。德国只需要在 4% 左右的农耕用地上架设高架农业光伏系统，就能满足德国当前的用电总需求。根据弗劳恩霍夫太阳能系统研究所的初步潜力估计，德国农业光伏的发电量潜力相当于大约 1700GWp。这里考虑的农业光伏用地主要栽种耐阴作物和典型的轮作作物。如果只使用这 1700 GWp 当中的 10%，这部分的电量就已经几乎相当于德国目前光伏发电能力的三倍。近地面安装的光伏组件每个阵列保持较宽的间距，太阳能电池阵列之间的空间可用于植物栽培。假设光伏铺设密度为每公顷 0.35MWp，在永久性草地上种植饲料作物的同

时，可挖掘 1200GWp 的发电潜力。从电力生产的角度来看，农业用地与农业光伏的双重利用比种植能源作物的效率要高得多（例如，每公顷发电电力高出能源用玉米 32 倍）。德国的能源作物种植占用了 14% 的农业用地（见图 11）。

2.4 德国的农业光伏实验基地

德国至少有五座研发用的试点农业光伏电厂已投入使用，同表 02 所示。下文包含了这些研究设施最为重要的数据和研究课题，并概述了其他研究项目的信息。

表 02: 德国当前的研究设施一览

农业光伏系统	所在地	农业用途类型	技术	装机容量	投运时间
1	魏恩斯特潘 (Weihenstephan) / 弗莱辛 (Freising), 巴伐利亚州	蔬菜种植	追踪型太阳能电池阵列	22 kW _p	2011
2	魏恩斯特潘 (Weihenstephan) / 弗莱辛 (Freising), 巴伐利亚州	蔬菜种植	联集管式太阳能屋顶	14 kW _p	2015
3	黑格尔巴赫 (Heggelbach), 锡格马林根县 (Sigmaringen), 巴登-符腾堡州	耕地	朝向西南的固定型光伏组件	194 kW _p	2016
4	格拉夫夏特-格尔斯多夫 (Grafschaft-Gelsdorf), 阿魏勒县 (Landkreis Ahrweiler), 莱茵兰-普法尔茨州	耕地	跟踪型, 固定朝向排列的、部分透明的光伏组件	258 kW _p	2021
5	莫尔谢尼奇 (Morschenich), 迪伦区 (Düren), 北莱茵-威斯特法伦州	耕地	跟踪型和固定朝向排列, 包含水管理	213 kW _p	2022

魏恩斯特潘，2013 年

2011 年，魏恩斯特潘-特里斯多夫应用技术大学 (Hochschule Weihenstephan-Triesdorf) 的园艺研究所做了首次尝试，建设了一座小型（朝南）的模拟地面光伏设施。屋顶的厚纸板模拟光伏组件投下的阴影。研究人员主要栽种了生菜。实验结果表明，位于光伏阵列正下方的遮阳面积较大，而北面区域的遮阳面积较小，不同的遮阳强度与土壤湿度导致植物的生长差异很大，并不适于实际应用。为了解决农业光伏系统下部区域过度遮阳的问题，项目于 2013 年建成了首个由东西向排列的光伏组件阵列所组成的农业光伏系统（见图 12）。

这些光伏组件光伏组件阵列上的组件间距各不相同，这样做是为了确定不同程度的遮阳对植物产量的影响，并确定最佳的光伏铺设密度。用大白菜做的试验表明，减产率介于 29% 到 50% 之间。实验结果取决于不同的遮阳程度，见表 03 所示。

导致农业光伏设施下方作物产量较低的主要原因可能是光伏设施建设时重型机械开过造成土壤压实，以及组件滴水檐下方的植物受到了损害。

技术参数：

- 基础面积：21 x 23 m = 483 m²
- 光伏组件阵列：3 个阵列，每个阵列尺寸 3.2 x 21 m，每个阵列 30 个组件，每块组件 1.6m²
- 追踪系统：东西向
- 光伏组件光伏组件：CSG 245 Wp；200 W/m²（平均值；245 W x 90 = 22 kWp；45 W/m²）
- 年发电量：约为 35 000 kWh
- 装机容量：22 kWp
- 应用：满足自身用能需求，无上网电价补贴

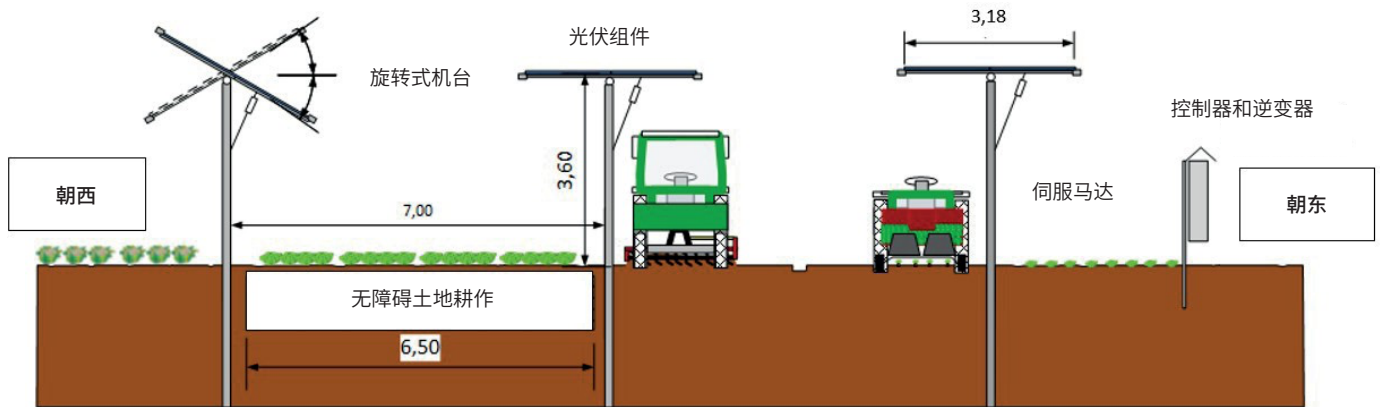


图 12：位于魏恩斯特潘的农业光伏设施横截面图
© 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer

表 03：对卷心菜作物的损害 © 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer

	部分密集铺设，太阳能组件阵列： 组件阵列的间距为 0cm	组件阵列的间距为 25cm	组件阵列的间距为 66cm	光伏设施外种植情况 作为比较
农业光伏系统下大白菜的每棵平均重量（2014 年）	1 348 g 农业光伏系统外收成的约一半	1 559 g 农业光伏系统外收成的约 56%	1 970 g 农业光伏系统外收成的约 71%	2 762 g

魏恩斯特潘，2015 年

给光伏组件的滴水檐安装排水沟后在冬天又出现了新的问题。为此，项目改为研究水平排布的固定型农业光伏管状光伏组件对作物收成的影响。

2015 年，魏恩斯特潘应用技术大学与 TubeSolar 公司联合建立了德国境内的第二座农业光伏研究设施。研究人员用它来测试管状光伏组件的实际适用性。设施的产能为 14kWp，地块上种植了土豆和生菜。针对“红叶生菜”（Lollo Rosso）这一生菜品种的试验结果显示，光伏管下方的蔬菜产量比没有农业光伏系统遮挡的作物最多低了 15%。这说明，至少在栽培园艺脆弱的植物的应用场景中，这种光伏组件可为农业光伏开辟新的应用前景。在做全面评价时，我们必须考虑作物生产的边际利润率（称之为“联产品”），以及相应的发电成本。

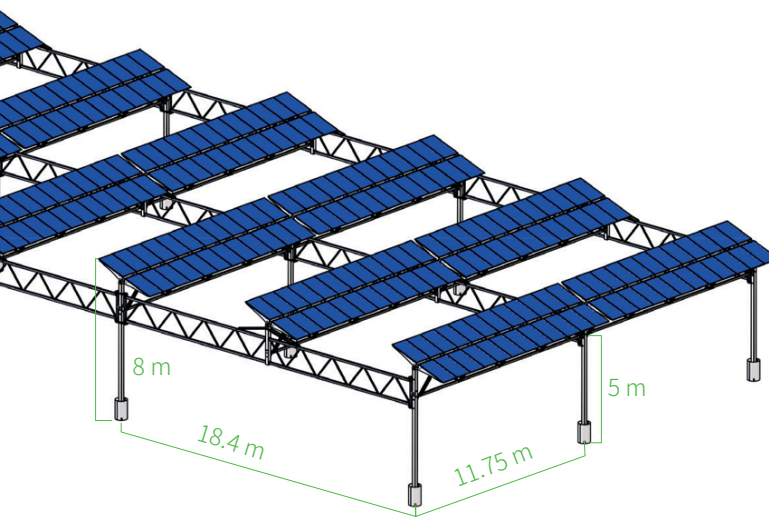


图 13：位于黑格尔巴赫的农业光伏设施草图

© AGRISOLAR Europe GmbH

黑格尔巴赫，2016 年

第三座农业光伏研究设施于 2016 年在德国博登湖畔的黑格尔巴赫建成，该设施是 APV-RESOLA 项目的组成部分。黑格尔巴赫农场社区三十多年来在 165 公顷的土地上进行生物动力的农业混合耕作。

试验作物包括冬小麦、马铃薯、芹菜和苜蓿草。双面玻璃太阳能组件之间留有较大的阵列行距，距地面高度超过 5 米，朝向西南，这样的排布能确保作物获得均匀的光照。净空高度和抬高距离可以确保土地耕种不会受到很大的限制，便于使用大型农业机械，例如联合收割机。光伏组件阵列之间的行距为 9.5 米，组件阵列的行宽为 3.4 米。这座研究设施的装机容量每年可为 62 个四人家家庭供电。由于太阳能组件阵列的行距较大，设施每公顷的装机容量比传统的地面光伏设施要低 25% 左右。

早在项目实施的第一个年头，即 2017 年，土地利用效率就提高了大约 160%，由此证明了这座农业光伏设施的实用性。光伏模块下的作物产量维持在参照无光伏模块土地产量的 80% 以上，从而证明了前者具有可盈利性。光伏组件光伏组件。

在第一年（2016 年 9 月至 2017 年 9 月），该农业光伏系统每千瓦峰值 (kWp) 的装机容量产生了 1266 千瓦时 (kWh) 电量，比德国全国平均的 950 千瓦时 (kWh) 高出三分之一。装机容量。发电量高的原因一方面归结于当地相对较为充沛的太阳辐射量日照，另一方面则得益于双面光伏组件所产生的额外效益。

技术参数：

- 基础面积：25 m x 136 m = 3 400 m²
- 光伏组件阵列：15 排 136 米长的阵列，每个阵列含 48 个组件，每个组件 1.7m²
- 追踪系统：无
- 光伏组件：双面玻璃组件，太阳能世界（SolarWorld）制造，270Wp 年
- 年发电量：2020 年大约为 256000kWh
- 装机容量：194.4 kWp
- 应用：满足自身用能需求，并电入网，不享受法定上网电价

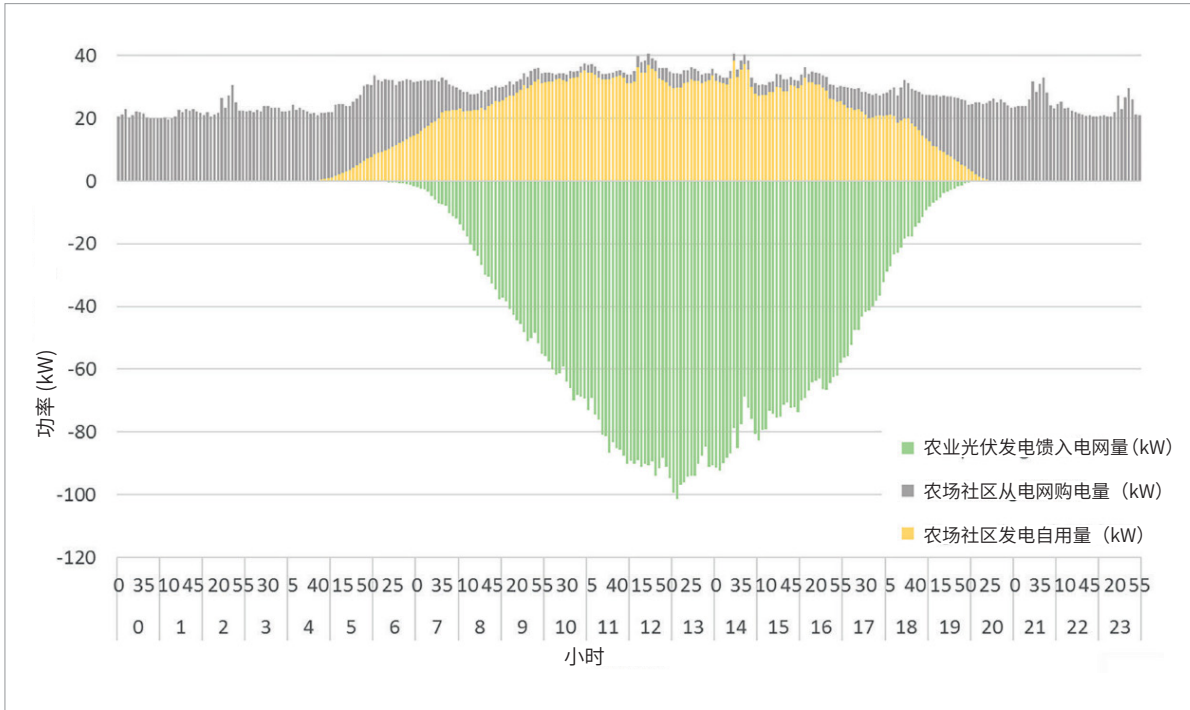


图 14: 2017 年夏天，黑格尔巴赫农场社区农业光伏的发电量几乎可以完全覆盖公社的用电需求 © BayWa r.e.

每天的发电量变化情况贴合农场社区的用电负荷变化。约 40% 的光电可直接用于农场社区的能耗，例如为电动汽车充电或用于加工农产品。在夏季，这座农业光伏设施几乎能够覆盖白日的全部用电负荷。系统加装了一台 150kWh 的蓄电池设备后，公社的能源自给自足率提升至 70% 左右。项目伙伴舍瑙发电厂负责接收富余电力。

2018 年的夏天十分炎热，当年的发电量和作物产量明显高于上一年。太阳能组件为下方的农田提供了一定程度的遮阳，由此提高了农作物产量，而充沛的日照也提高了光伏组件的发电量。马铃薯栽种试验证明，土地利用效率提高了 86%。

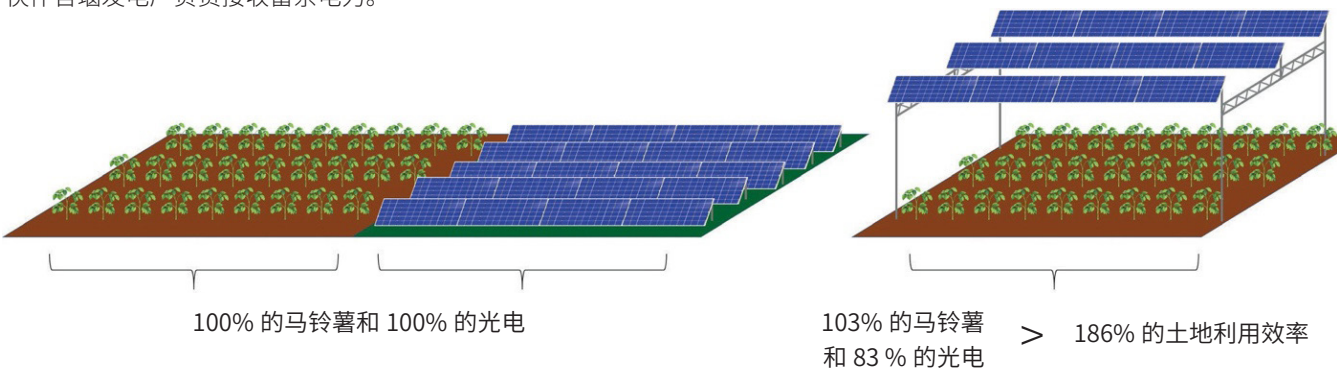


图 15: 在黑格尔巴赫的试验基地里，结合农业光伏系统后的马铃薯种植地的土地利用效率高达 186% © 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

研究小组认为，太阳能组件的遮阳效果更好地保护了植物，使之能够抵御 2018 年酷暑所形成的干旱。上述观察结果表明，农业光伏在干燥缺水地区有一定发展潜力，但仍有必要在不同气候区以及更多的作物上进行尝试。

黑格尔巴赫试点项目的结果说明，农业光伏的发电量和收成稳定。特别是在干旱时期，作物能够受益于太阳能组件的遮阳效果 [5]。章节 3.1 更为详细地介绍了农业试验的结果。

2018 年的太阳能辐射量为 1319.7kWh/ m²，比上一年提高了 8.4%，这使 2018 年的发电量增加了 2%，达到 249,857kWh，相当于每 kWp 的单位发电量高达 1285.3kWh。

德累斯顿应用技术大学的研究项目

德累斯顿应用技术大学 (HTW Dresden) 中, 由 Feistel 教授领导的团队多年来一直从事农业光伏研究, 重点分析光伏系统对土壤水分平衡的影响, 尤其关注蒸发和渗透的变化, 并将其置于气候危机所导致的后续损害背景下进行评估。研究范围涵盖了大型光伏装置和小型农业光伏系统。

Agri4Power 项目 —— 可再生能源、农业和生物多样性的可持续组合

弗劳恩霍夫国际管理和知识经济中心 (IMW) 2020 年至 2021 年开展的 Agri4Power 项目研究了如何将垂直双面光伏组件与花带结合起来, 创造可持续的协同效应, 兼顾物种保护与农业生产。该项目探讨了经济和生态方面的影响, 以及社会接受度问题 [14]。

农业光伏水果种植项目 (APV Obstbau), 2021 年

在农业光伏水果种植项目的框架下, 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所联合了其他研究和实践领域的合作伙伴, 共同研究农业光伏系统在苹果种植中是否可以替代冰雹防护网和覆盖薄膜的保护功能, 确定适宜的系统设计, 并评估其对作物产量的影响。项目于 2021 年春季在位于莱茵兰 - 普法尔茨州阿魏勒县格尔斯多夫的纳赫特韦有机水果农场 (Nachtwey) 建设了一座 258 kWp 的农业光伏试验设施。该果树种植农业光伏系统将重点研究光照管理、设备设计、景观美学、经济可行性、社会兼容性和植物栽培参数等方面。

技术参数:

- 基础面积: $32 \text{ m} \times 111 \text{ m} = 3\,552 \text{ m}^2$
- 光伏组件阵列: 8 排 111 米长的固定型农业光伏阵列, 每排 106 个组件, 每个组件 2.1 m^2
- 3 排 111 米长的追踪型农业光伏阵列, 每排 100 个组件, 每个组件 2.1 m^2
- 追踪系统: 单轴
- 光伏组件: 半透明的双面玻璃组件, 225Wp
- 年发电量: 约为 276000kWh (预测值)
- 装机容量: 258 kWp
- 应用: 电动拖拉机的运作, 水泵, 并网, 不享受法定上网电价

项目共有四种实验变体 (1) 带有标准防雷网的控制变量; (2) 农业光伏设施; (3) 减少农药使用量的农业光伏设施; (4) 薄膜棚顶。有关社会接受度和兼容性方面的研究关注不同利益相关方之间的潜在冲突 (土地使用、分配、过程公正性)。

农业光伏 APV2.0 项目

农业光伏 APV2.0 项目由于利希研究中心 (Forschungszentrum Jülich) 牵头, 进一步开发了辐射与模拟联合模型, 旨在同时优化光伏产量和作物产出。为了记录作物所受的影响, 光伏支撑结构安装了一个表型系统, 用于定量分析和测量植物的外观及状态。此外, 项目正在开发新型的跟踪算法、雨水收集系统和智能灌溉策略。该研究设施于 2021 年 12 月建成。

技术参数:

- 基础面积: $2 \times 25 \text{ m} \times 41 \text{ m}$; $2 \times 22 \text{ m} \times 39 \text{ m}$
- 总计: $2050 \text{ m}^2 + 1716 \text{ m}^2 = 3766 \text{ m}^2$
- 追踪系统: 子系统东西朝向, 研究算法; 两个子系统静态光伏组件光伏组件: 370Wp, 双面
- 装机容量: 约 300kWp
- 应用: 满足自身用能需求, 不享受法定上网电价



图 16: 纳赫特韦有机水果农场上的农业光伏设施
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

2.5 德国的私营光伏基地

除了研究设施之外，德国还有十几座私营农业光伏设施。其中，电气公司 Guggenmos 自 2008 年以来就在巴伐利亚的 Warmsried 开展农业光伏项目，种植土豆、小麦和大葱。下文介绍了其中的一部分设施。更多设施目前尚在规划阶段。

布伦，2019 年

在北莱茵 - 威斯特法伦的布伦，两位农场主法比安·卡尔瑟斯 (Fabian Karthaus) 和约瑟夫·克尼尔 (Josef Kneer) 于 2019 年开始在他们的有机浆果农场建设农业光伏设施。该设施作为特殊作物温室提交了建设申请，并根据《联邦建筑法》第 35 条获得了特许项目的批准。

技术参数：

- 基础面积：70 x 60 m = 4 200 m²
- 光伏组件阵列：20 个阵列，每个阵列尺寸 3.5 x 60m (116 个组件，每块组件 1.6m²)
- 组件朝向：东西向 15°
- 光伏组件：双面组件：类型“太阳能工厂” (Solarfabrik)，特殊制造产品 320Wp (200W/m²)
- 应用：50% 自用 /50% 并网上网
- 装机容量：750 kW_p
- 逆变器：华为 110kW_p

该设施的支撑结构采用了所谓的“Venlo”型温室结构，共包括 20 个双坡面。

结构材料为钢和铝型材。支撑结构采用打桩式地基固定在地面上。设施的网格尺寸 (3.5m x 4.2m) 与 3.2 米的净空高度确保农场可使用标准化农业机械完成耕作。设施顶部由双面光伏组件构成，一方面用于发电，另一方面帮助下方种植的特殊作物抵御恶劣天气，并起到遮阳的作用。电缆仅在屋顶结构中布置，以确保光伏模块下方土地的顺利耕作。

光伏设备下方种植了蓝莓、覆盆子和苹果，采用堆垄栽培方式。光伏设施的每个坡面下方都是一条垄。垄的供水由基于传感器的滴灌系统控制。灌溉基于每天的温度、风力、阳光强度和预测的降雨量。每个坡面的滴水檐位于垄与垄的间隔地带。雨水渗入设施，排水管负责收集和处理雨水。

据农场主反馈，蓝莓在最初几年产量非常高。第一年的草莓产量则稍有降低。苹果和葡萄的收成情况尚未知。

表 04：德国的实践设施一览

农业光伏系统	所在地	农业用途类型	技术	装机容量	投运时间
1	瓦姆里德，巴伐利亚州	耕地、蔬菜种植、畜牧业	固定朝向的光伏组件机台	70 kW _p	2008
2	埃佩尔伯恩 - 迪明根 (Eppelborn-Dirmingen)，萨尔州	饲料	垂直光伏组件机台	2 000 kW _p	2018
3	布伦 - 斯坦巴赫 (Büren-Steinbach)，北莱茵 - 威斯特法伦州	浆果类水果种植	追踪型光伏组件机台	750 kW _p	2020
4	多瑙辛根的阿森 (Donaueschingen Aasen)，巴登 - 符腾堡州	饲料	垂直光伏组件机台	4 146 kW _p	2020
5	阿尔泰格纳伯格 (Althegenberg)，巴伐利亚州	特殊作物和浆果树丛	单轴追踪型光伏组件机台	749 kW _p	2020
6	吕普蒂茨 (Lüptitz)，萨克森州	畜牧业、蔬菜种植、蜜源植物	单轴追踪型光伏组件机台	1045 kW _p	2021

多瑙辛根的阿森人民太阳能公园，2020 年

在多瑙辛根 (Donauesschingen) 北部地区的阿森 (Aasen) 附近，Next2Sun 公司与运营商索尔维德公民电厂能源合作社 (Solverde Bürgerkraftwerke Energiegenossenschaft) 合作，建造了一座垂直型的农业光伏设施，装机容量约为 4.1MWp。该电厂理论上可以满足 1400 户家庭的用电需求 [15]。在项目实施过程中，原先的耕地转变为粗放使用的牧场。光伏阵列的行距为 10 米时，所占基础面积最小，这样可以确保光伏阵列之间的空间可用于农业耕作。

技术参数：

- 基础面积：140000 m²
- 光伏组件阵列：33 个阵列，长度可达 400 米
- 10960 个模块
- 组件朝向：东 90°或西 270°
- 光伏组件：双面玻璃组件，类型：
- 中来光电 Jolywood JW-D72N, 370-380Wp (正面)，每块组件有 72 个 6 英寸的单体太阳能电池组成
- 应用：百分之百并入电网
- 装机容量：4146 kWp
- 年发电量：4814 MWh
- 逆变器：46 x 华为 SUN2000-60KTL-M0

吕普蒂茨人民太阳能公园，2021 年

索尔维德公民电厂能源合作社在莱比锡附近的吕普蒂茨经营着另一座农业光伏设施。项目方将一座既有地面光伏设施改造成为功率更大、更为现代化的近地农业光伏设施。尽管拆除老光伏电站的成本花费很高，但运营商表示，吕普蒂茨项目重新发电后创造了可观的经济效益。设施建在工业用地上，于 2021 年 6 月投产。

技术参数：

- 基础面积：165000 m²
- 12 个不同长度的太阳能组件阵列 (最长为 190 米)
- 共有 2520 个组件
- 光伏组件阵列：东南向 166°的旋转轴
- 光伏组件：双面 2520 个中来光电 Jolywood JW-HD144N, 每个 415Wp
- 应用：百分之百并入电网
- 装机容量：1045.80 kWp
- 年发电量：(预计) 1350MWh
- 逆变器：29 x 华为 SUN2000-30KTL-M3



图 17：位于多瑙辛根阿森的垂直农业光伏项目
© 索尔维德公民电厂



图 18：太阳能电池双面组件阵列
黑格尔巴赫农业光伏设施
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

2.6 德国的研究项目

表 05：德国部分研究项目概览

项目	运行时间	客户	项目合作伙伴	更多信息
APV Obstbau	01.04.2020 - 01.03.2025	BMEL* ¹ , MKUEM* ²	Bio-Obsthof Nachtwey, BayWa r.e. Solar Projects GmbH, DLR-RLP* ¹¹ , EWS* ¹² , Vertriebs GmbH, AGCO GmbH* ¹³ , 弗劳恩霍夫 ISE	 https://s.fhg.de/Orcharding
Agri4Power	01.05.2020 - 30.06.2021	BMWK* ³	弗劳恩霍夫 IMW* ¹⁴ , DBFZ* ¹⁵ 、萨克森 - 安哈尔特文化景观基金会, UFZ* ¹⁶	 https://s.fhg.de/Agri4PowerGER
Landgewinn	01.09.2021 - 31.08.2024	BMWK、尤利希项目管理机构	奥芬堡应用科学大学, 弗劳恩霍夫 ISE、KIAF* ¹⁷ , IÖW* ¹⁸	 https://s.fhg.de/LandgewinnGER
AgriFEe	01.01.2022 - 31.12.2026	BMBF* ⁴	尤利希研究中心、弗劳恩霍夫 ISE	 https://s.fhg.de/AgriFEe20EN
示范区 Agri-PV BW	01.01.2022 - 01.11.2024	MLR* ⁵ , UM BW* ⁶	* 凯尔应用科学大学, LVWO* ¹⁹ , LTZ* ²⁰ , KOB* ²¹ , Obsthof Bernhard, RWB* ²² , Obsthof Vollmer, 弗劳恩霍夫协会	 https://s.fhg.de/ModelregionEN
SynAgri-PV	01.07.2022 - 01.06.2025	BMBF* ⁴	**ZALF* ²³ , 霍恩海姆大学, Elysium Solar GmbH, BBH PartGmbH* ²⁴ , 环境能源权利基金会, 博世及伙伴公司, Fabian Karthaus, Hofgemeinschaft Heggelbach, 弗劳恩霍夫 ISE	 https://s.fhg.de/SynAgriPVEN
VAckerPower	01.11.2022 - 01.10.2025	BMWK	Next2Sun Technology GmbH、弗劳恩霍夫 ISE	 https://s.fhg.de/VAckerPowerEN
VAckerBio	01.10.2022 - 01.09.2023	DBU* ⁷	霍恩海姆大学、Next2Sun Technology GmbH、弗劳恩霍夫 ISE	 https://s.fhg.de/VAckerBioENG
VitiVoltaic	01.07.2020 - 30.06.2025	ERDF* ⁸ , efrereact* ⁹ , HMKLV* ¹⁰	盖森海姆大学	 https://s.fhg.de/VitvoltaicEN
VitiCult-PVmobil	01.01.2023 - 01.12.2025	BMBF	sbp sonne GmbH* ²⁵ , Hochschule Geisenheim University, 弗劳恩霍夫 ISE	 https://s.fhg.de/VitcultEN
Weinbau 4.0	15.05.2023 - 31.12.2027	MLR, EFRE	WFG* ²⁶ , ZG Raiffeisen eG, ZG Raiffeisen Technik GmbH, Intech GmbH & Co. KG, HEG* ²⁷ , Sick AG, WBI* ²⁸ , KIAF, 弗劳恩霍夫 ISE, BürgerenergieKaiserstuhl 等。	 https://s.fhg.de/Weinbau40GER

*1 德国联邦食品和农业部 (BMEL)

*2 莱茵兰 - 法尔茨州气候保护、环境、能源和交通部 (MKUEM)

*3 德国联邦经济和气候保护部 (BMKW)

*4 德国联邦教育与研究部 (BMBF)

*5 巴登符腾堡州食品、农村地区和消费者保护部 (MLR)

*6 巴登 - 符腾堡州环境、气候保护和能源部 (MU BW)

*7 德国联邦环境基金会 (DBU)

*8 欧洲地区发展基金 (ERDF)

*9 欧洲团结和领土恢复援助 (REACT)

*10 黑森州环境、气候保护、农业和消费者保护部

(HMKLV)

*11 莱茵法尔茨农村地区服务中心 (DLR RLP)

*12 舍瑙电厂 (EWS)

*13 盟友 - 拾穗者合作公司 (爱科公司)

*14 弗劳恩霍夫国际管理和知识经济中心 IMW

*15 德国生物质研究中心 (DBFZ)

*16 亥姆霍兹环境研究中心 (UFZ)

*17 卡尔应用研究所 (KIAF) *18 生态经济研究所 (IÖW)

*19 国家葡萄栽培和水果种植教学与研究中心 (LVWO)

*20 奥古斯登堡农业技术中心 (LTZ)

*21 康斯坦茨湖水果种植能力中心 (KOB)

*22 博登湖地区办事处 (RWB)

*23 莱布尼茨农业景观研究中心 (ZALF)

*24 Becker Büttner Held Rechtsanwälte Wirtschafts prüfer Steuerberater PartGmbH

*25 schlaich bergemann partner - sbp sonne 有限责任公司

*26 埃门登根地区经济发展局 (WFG)

*27 海德堡能源合作社 eG (HEG)

*28 弗莱堡州立葡萄栽培研究所 (WBI)

APV 水果种植项目

在农业光伏 (APV) 水果种植项目框架下，弗劳恩霍夫太阳能系统研究所联合了跨领域的研究和实践伙伴，专注于探究苹果种植中，农业光伏系统如何有效替代防雹网和薄膜以保护植株。研究内容包括系统设计的具体方法，以及该系统对作物产量的潜在影响。目标是实现既能保护果树又能收集太阳能的双重效益。

Agri4Power 项目

从 2020 年至 2021 年，弗劳恩霍夫太阳能系统研究所实施的“Agri4Power”项目，研究了垂直双面太阳能系统与花带结合的可行性，旨在创造可持续的协同效应，既促进物种保护又支持农业生产。项目还涉及经济性和生态性的考量，并探讨了社会接受度的问题 [14]。

土地收益 (Landgewinn) 项目

“Landgewinn”是一个为期三年的联合项目，由多个研究机构共同参与，包括奥芬堡应用科学大学可持续能源系统研究所的能源系统和能源经济学研究小组、光伏技术和生物碳研究小组、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、凯尔公共管理应用科学大学和生态经济研究所。

该项目对包括热解技术生产植物煤、农业机械脱碳技术以及农业光伏技术在内的三种脱碳技术进行了跨学科研究旨在揭示农业部门在减少二氧化碳排放方面的巨大潜力及实施路径。在此框架下，弗劳恩霍夫太阳能系统研究所特别关注从经济与生态维度深入分析农业光伏技术的应用前景，而凯尔应用科学大学则聚焦于相关法律框架的研究。

项目的核心目标在于推动农业部门的能源供应与排放结构与中长期气候目标相契合，应对农业领域长期面临的排放与能耗压力。通过综合评估农业与能源部门的互动关系，项目致力于开辟新的技术路径，如农业电动车、电力需求灵活化及农林系统等，为实现德国的能源转型与气候保护目标贡献力量。

AgriFEe 项目

在“光伏与植物生产耦合”项目 (“AgriFEe”，前身为“APV2.0”) 中，尤利希研究中心牵头开发了耦合辐射和模拟模型，实现了光伏效能与植物生产效率的联合优化。为精准评估光伏设施对农作物生长的影响，项目引入了一套专为光伏环境设计的表型分析系统，该系统能够定量分析和测量植物的生长状况与外观变化。此外，项目团队还创新性地研发了跟踪算法、雨水高效收集系统及智能化灌溉策略，以进

一步提升农业光伏系统的综合效益。尤利希研究中心于 2021 年 12 月在 Morschenich-Alt 正式设立。

巴登-符腾堡州农业光伏示范区

作为推动巴登-符腾堡州农业光伏技术进步的重要举措，“巴登-符腾堡州农业光伏示范区”项目第一实施阶段聚焦于核果与浆果类作物的光伏农业应用。该项目汇聚了包括弗劳恩霍夫协会在内的 13 个合作伙伴的力量，共同探索农业光伏的潜力。在巴登-符腾堡州内，五处农业光伏系统正在紧锣密鼓地建设中，总装机容量预计将达到 1700 千瓦。截至 2022 年，克雷布隆 (Kressbronn)、巴文多夫 (Bavendorf) 和海赫林根 (Heuchlingen) 三地的项目已顺利完成建设并投入运营。凯尔应用科学大学与弗劳恩霍夫太阳能系统研究所携手启动了专项框架计划。

该计划还包括在其他地点推广实施的可能性、针对特定作物的植物设计方案以及法律框架调整等话题。农业研究由奥古斯坦贝格农业技术中心、博登湖水果种植能力中心以及国家葡萄栽培和水果种植教学与研究中心负责。该项目由巴登-符腾堡州环境、气候保护和能源部以及食品、农业和消费者保护部资助。

SynAgri-PV

“协同整合农业光伏发电，推动能源转型 -- 为德国农业光伏市场的发展提供网络和支持”研究项目 (“SynAgri-PV”) 于 2022 年 7 月启动，时长 3 年，由德国联邦教育与研究部出资支持。

该项目的总目标是描述和评估在德国市场上推广农业光伏所面临的主要技术、法律、经济和社会框架条件和要求，并据此为推广农业光伏系统提出建议。

在弗劳恩霍夫太阳能系统研究所和莱布尼茨农业景观研究中心 (ZALF) 的协调下，项目汇聚了来自霍恩海姆大学、Kanzlei Büttner Held 律师事务所、环境能源权利基金会、Elysium 太阳能有限公司以及博世及伙伴公司等多元领域的合作伙伴。项目团队将深入分析德国各地已建成的农业光伏系统数据，特别是帕德博恩附近的法比安·卡特豪斯 (Fabian Karthaus) 农场与博登湖畔黑哥巴赫农村合作社 (Hofgemeinschaft Heggelbach) 农场的成功案例，这些实地经验将直接作为项目原型构建的宝贵素材。

“SynAgri-PV”项目致力于在广泛利益相关者的积极参与下，为德国农业光伏的推广制定明确、可行的目标。项目将明确实现这些目标所需的具体行动步骤，探讨解决方案，并识别出需要进一步深入研究的细分领域。为了实现这一目

标，项目将采取多样化的参与方式，广泛收集并深入分析研究结果，最终将成果将以易于理解的形式呈现给公众及政策制定者。

Vacker 项目

“VackerPower”和“VackerBio”项目目前正在对耕地中的垂直双面农业光伏系统的应用进行探索。

这两个项目的紧密结合，可以从农业和光伏运营两个角度全面了解在耕地上安装垂直光伏系统的方案。

“VackerPower”项目聚焦于垂直农业光伏系统对耕地利用的影响。作为德国首次在耕地中尝试安装垂直光伏系统的技术创新，VackerPower 不仅关注其技术可行性与实施挑战，更在实际运行环境中（包括土壤污染防治、作物保护剂与化肥使用等复杂条件）评估系统的运行稳定性与优化潜力。最终，项目将精选出具有代表性的地点，为后续研究与分析奠定坚实基础。

“VackerBio”的项目的研究重点是农业光伏系统对耕地利用和生物多样性的影响。项目团队通过持续监测微气候变化、土壤质量动态及作物生长状况，细致分析光伏系统对种植环境的实际影响。此外，该项目还积极探索在光伏系统组件下的未开垦地带促进生物多样性的可能途径。实践部分将在梅尔齐希-韦林根的农业光伏电站试验区进行。

VitiVoltaic 项目

该项目由盖森海姆大学负责，研究聚焦于光伏组件在减轻气候变化对葡萄栽培影响方面的潜力。该项目于 2022 年在盖森海姆建成，由 ERDF（“APV-Wein-bau4Real”）、ERDF-REACT（设备）和黑森州环境、气候保护、农业和消费者保护部（“VitiVoltaic4Future”）出资支持。

VitiCult-PVmobil 项目

该项目旨在为葡萄藤幼苗开发一种移动式农业光伏系统。项目合作伙伴包括 sbp Sonne、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所和盖森海姆大学。目前，项目团队正致力于研究该系统在技术和经济上的适用条件，以及从农学角度深入探讨其对葡萄藤生长的具体影响。该项目由德国联邦教育与研究院资助，目前正在积极开发相关原型系统。

Weinbau 4.0 项目

作为 RegioWIN 项目“葡萄栽培 4.0”的一部分，奥伯基希（Oberkirch）和伊赫林根-布兰肯霍恩斯贝格（Ihringen-Blankenhornsberg）的子项目“葡萄栽培中的农业光伏”和

里格尔（Riegel）的“葡萄栽培中的农业光伏 / 公民光伏”将由弗莱堡葡萄栽培研究所领导，分析农业光伏对南莱茵河上游-高莱茵河地区葡萄栽培的影响。“葡萄栽培 4.0”由巴登-符腾堡州和欧洲地区发展基金（ERDF）的资助。作为灯塔项目，它在 RegioWIN 2030 “通过创新和可持续发展提高地区竞争力”的州级竞赛中获奖。

该项目的重点是在技术上实现农业光伏系统在葡萄栽培中的应用，并将葡萄藤作为附属作物进行研究。第一步是厘清葡萄藤的生长发育、农业光伏系统对葡萄藤的保护作用以及栽培方案等问题。此外，还需讨论产量、葡萄质量和葡萄酒质量等问题。合作伙伴包括 Intech GmbH & Co KG、海德堡公民能源合作社和作为“葡萄栽培 4.0”项目发言人的埃门丁根经济促进会有限责任公司（Wirtschaftsförderungsgesellschaft des Landkreises Emmendingen mbH）。其他参与项目的合作伙伴包括弗莱堡葡萄栽培研究所、凯尔应用研究所（KIAF）和弗劳恩霍夫太阳能系统研究所。

目前，项目团队已在弗莱堡及其周边地区的布兰肯霍恩斯堡、里格尔和奥伯基希三个地点开展了农业光电技术对葡萄栽培影响的实地分析工作。位于里格尔的试点工厂目前正在开发中。

2.7 国际发展

全球农业光伏的装机容量超过 14GWp（弗劳恩霍夫太阳能系统研究所的估计值），其中中国占最大份额，总装机量超过 12GWp（截至 2021 年 7 月）。中国也拥有着世界最大规模的农业光伏设施：在戈壁沙漠的边缘，装机容量为 700MWp 的光伏设施下方种植了大量浆果。此举也有助于沙漠化的防治。其他亚洲国家，例如日本和韩国主要致力于推广小型农业光伏设施。日本目前有超过 3000 座农业光伏设施。韩国政府计划在农场上建造 10 万座农业光伏设施，为农民提供月收入约 1000 美元的养老金保障（电力销售每月的收入约为 1000 美元），以缓解农村人口流失，防止农场荒废。

在日照强烈的（半）干旱地区，尤其是发展中国家和新兴国家，农光互补的多重效益可能带来显著优势。除了为作物和牲畜提供遮阳外，农光互补还能提供电力，用于水的抽取和净化，帮助遏制沙漠化和土壤退化。依靠农光互补，原本无法在干热气候和强烈阳光下种植的作物，未来有望得以种植。此外，农业光伏项目通过为农民提供电力，可以进而改善偏远农村地区的信息获取、教育、医疗服务（例如疫苗和药品的冷藏）等，并为农民开拓了新的收入来源。同时，这也减少了农村地区对化石燃料（如柴油发电机）的依赖。

此外，农业光伏项目产生的电力可以直接用于冷却与加工农产品，由此延长农产品的保鲜期，更有利于这类产品的

市场销售。农场品能在非时令期销售，从而提高农民收入。虽然农业光伏的发展潜力巨大，但许多国家仍面临着种种政治与经济挑战。特别是，政治的不稳定性和有限的经济发展水平对农业光伏的技术转让和长期投资构成了障碍。

弗劳恩霍夫太阳能系统研究所在印度马哈拉施特拉邦 (Maharashtra) 一地所做的初步研究表明，得益于遮阳效果和较低的蒸发量，农业光伏设施下的番茄和棉花产量可提高 40% [16]。在特定条件下，弗劳恩霍夫太阳能系统研究所的研究人员预计该地区的土地使用率可以翻一番。

在欧盟地平线 2020 计划 (Horizon 2020) 的框架内，弗劳恩霍夫太阳能系统研究所正与阿尔及利亚的合作伙伴携手开展 WATERMED 4.0 项目，研究农业光伏对水资源管理的影响。光伏组件不但能够减少蒸发量、降低空气和土壤温度，还可以用来收集雨水。通过太阳能组件收集雨水的做法（尤其考虑到越发频繁发生的干旱）对许多国家来说十分具有吸引力，甚至德国的一些地区也能从中获益 [17]。

2.7.1 在智利开展的研究项目

2018 年春，智利弗劳恩霍夫研究所在圣地亚哥周边的艾尔蒙地 (El Monte)、库拉卡维 (Curacavi) 和兰帕 (Lampa) 市参与建设了三座装机容量为 13 kWp 的农业光伏设施。该地区全年日照充足日照且降雨量较少。长年干旱导致降水量在过去十年间减少了 20% 至 40%。受气候条件所迫，当地农民积极寻找能够遮阳的设施，以防止作物干枯和晒伤，因此，农业光伏设施在此地展现出极大的协同潜力。

在当地政府的支持下，项目参与方研究了哪些作物可从较少的日照中受益。当地农场的情况迥异：一家种植西兰花和花菜的农场将农业光伏生产的电力用于作物收割后的清洗、包装和冷藏等流程。另一座光伏设施则位于专门从事草药种植的家庭农庄里。第三座设施位于基础设施薄弱、电力供应不稳定的偏远地区，为当地七户家庭提供可靠的电力。

位于智利的这三座设施是拉丁美洲境内的首批农业光伏设施。该研究项目重点关注如何将农业光伏技术调整并优化以适应当地气候与经济条件。农业收成与太阳能发电的结果令人欣喜。因此，智利弗劳恩霍夫研究所决定在当地政府的支持下进一步扩大研究项目。研究团队也将继续监测三座试点设施的现场运行情况 [18]。



图 19：智利弗劳恩霍夫研究所建在库拉卡维和兰帕的试点设施致力于研究哪些作物能从较少的日照中获益

© 智利弗劳恩霍夫研究所

2.7.2 法国

从 2017 年开始，法国为农业光伏项目单独进行招标，每年计划新增 15MWp 装机容量。中标的决定因素一方面基于报价，另一方面则取决于项目的创新性。单个项目最大的装机容量不得超过 3MWp。在 2017 年的第一轮招标中，仅温室项目中标。在第二轮和第三轮中，共提供 140 MW 的招标容量，适用于 100 kWp 到 3 MWp 之间的项目。中标项目可享受二十年的上网电价补贴。2020 年 3 月，40MW 的农业光伏项目中标，主要为追踪型光伏电池组件。2018 年，在特塞尔 (Tresserre, 欧西坦尼亚大区的东比利牛斯省)，建成了当时欧洲规模最大的用于葡萄种植的追踪式农业光伏设施。

然而，法国农业光伏也面临着社会接受度问题。由于第一轮招标没有明确农业光伏的标准，一些项目几乎没有或完全没有结合农业生产。光伏行业的此类搭便车效应导致农业部门在一定程度上对农业光伏有所抵制。目前，法国能源环保机构 ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) 目前正在制定农业光伏标准。

2.7.3 美国

美国也建设了农业光伏设施。位于马萨诸塞州的一座研究设施成功证明了农业生产与发电能够实现双赢。在此基础上，该州从 2018 年开始为农业光伏项目提供资助。资助对象须满足以下要求：只有建在指定农业用地上且不超过两兆瓦的设施才有资格申请资助。对固定安装的太阳能组件阵列，组件下缘必须至少离地 2.4 米高，对于有组件跟踪系统的光伏设施，组件下缘离地至少要有 3 米。农耕期间，田地任何一处的遮阳比例不得超过 50%[5]。

在农村能源促进计划（REAP）的框架内，美国农业部提供补贴资金，用于在农村地区推广光伏设施，这也势必将促进农业光伏的应用。

目前，亚利桑那州、科罗拉多州、印第安纳州和俄勒冈州均有类似设施。特别受欢迎的是那些并非专注于农业用途，而是与生物多样性丰富的栖息地相结合的设施。多所大学和研究机构正致力于开发可持续的商业模式，以提升以农业利用为重点的农业光伏设施的吸引力。

2.7.4 马里和冈比亚

马里和冈比亚是全球遭受气候危机影响最大的地区之一。干旱等极端天气事件的发生频率还将不断上升。马里和冈比亚农业光伏项目（APV-MaGa）研究如何通过集成式雨水收集来提高农业生产稳定性，并确保粮食与能源安全。

由马里、冈比亚和德国组成的国际联合组合负责农业科学、社会经济和太阳能领域的研究。该联合体致力于研究农业光伏的挑战与机遇，深入了解粮食、水、能源三者的协同及相互作用。此外，项目还涉及到探讨农业光伏技术对社会经济的影响，力求积极推动合作国农村地区的可持续发展。



图20：法国蒙彼利埃大学的农业光伏研究设施对不同的生菜品种进行了研究

© INRAE/ Christian Dupraz

3 农业

近年来的极端天气表明，愈演愈烈的全球变暖现象不再是流于纸面的抽象危险，而已经对德国农业产生了巨大影响。尤其是对植物生长至关重要的春季，降水量在过去 30 年中显著下降 [19]。虽然加强灌溉力度有助于缓解干旱并保证农业的产量，但在许多地方开采地下水和地表水都受到限制。因此，我们必须找到其他的应对措施。除干旱外，强降雨和冰雹等极端天气也对农作物构成了威胁。

为应对气候危机挑战，并且在保护水资源的同时提高产量，需要农作物采取一些保护措施。相应的措施包括在温室和薄膜大棚中栽培作物，或在果树种植中使用防雹网。市场上针对高价值的特殊作物有各类预防霜冻和冰雹损害的措施，例如加热线、防霜冻蜡烛到固定式的燃气或燃油燃烧器，甚至还包括用直升机或防雹飞机将细小的碘化银颗粒散播在云层下方。随着气候变化，这类农作物的技术性和机械性保护措施在未来几十年内预计会变得愈发重要。

农业光伏项目有助于应对上述多重挑战。农业光伏为农业经营者提供了多样化的盈利机会。减少蒸发率、防止冰雹和霜冻是农业光伏设施发挥的最大优势。通过太阳能设施现有的支架结构，人们还能够低成本地整合其他作物保护系统，这能显著提高农地的生产力。

然而，农业光伏的应用也给农业生产带来了一系列的挑战，包括光照条件的改变，以及因支架结构而导致的作业难度增加。为了尽可能降低风险，扩大协同效应，农业光伏设施设计时应注意选取合适的作物并制定相应的种植方案。



图 21：黑格尔巴赫研究的作物（苜蓿草、土豆、小麦、苜蓿草）

© 霍恩海姆大学 /Andrea Bauerle

3.1 APV-RESOLA 项目的研究成果

在 APV-RESOLA 研究项目中，黑格尔巴赫农业光伏实验基地成功实现了多种作物的轮作种植，包括苜蓿草、冬小麦、马铃薯和芹菜。研究表明，农业光伏设施对农业产量的影响与气候条件密切相关。农业光伏设施下方种植的马铃薯收成在不同年份呈现出了差异。相较于参考土地的产量，2017 年的收成降低了 20%，而在干旱炎热的 2018 年，马铃薯的产量高于参考值 11%。

根据地理位置和当地气候条件的不同，农业光伏设施可以减少水分蒸发，并保护作物免受过度日照的影响。农业光伏设施下鉴于欧洲中部与德国近年来高温热浪频发，农业光伏设施愈发凸显了这方面的优势。马铃薯的生长情况也表明，农业光伏设施提高了块茎类农产品 [20] 产量。

霍恩海姆大学的科学家们采集了作物生长、产量和收成质量相关的数据，并测量了农业光伏设施下微气候条件的情况。研究对象不仅涉及农业光伏设施下方的农田，还包括没有架设光伏组件的参考农田（见图 22）。研究显示，农业光伏设施下方的有效辐射比参考区域低约 30%。此外，农业光伏设施主要会影响到降水分布和土壤温度。在安装了农业光伏系统的区域，春夏两季的土壤温度低于参考土地，但空气温度基本没有变化。在 2018 年炎热干旱的夏季，农业光伏设施下的麦田的土壤湿度高于参考区域。

2017 年试验田的产量数据令人欣喜：苜蓿草的产量相较于与参考区域只减少了 5.3%。而马铃薯、小麦和芹菜由于遮阳的影响，产量下滑幅度更为明显一些，约为 18% 到 19%。

2018 年年干旱条件下，冬小麦、马铃薯和苜蓿草的收成高于参考区域。芹菜产量增加了 12%，土豆和冬小麦的产量分别增加了 11% 和 3%。苜蓿草的收成与参考区域相比则减少了 8%。在计算总损失时，还要将支架结构之间无法耕作的土地损失纳入计算范畴，这部分的比例约为 8%。

2019 年，农业光伏试验田的苜蓿草、小麦和芹菜分别减产 19%、28% 和 33%。2020 年，农业光伏设施下方种植的小麦产量有 2% 的增长。

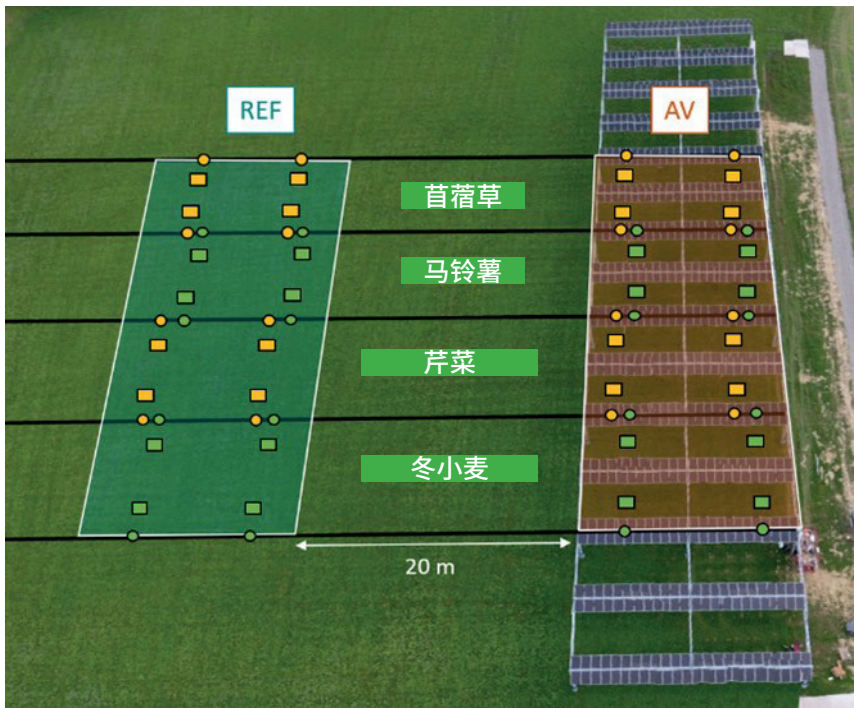


图 22：2017 年的试验田种植计划图，带测量站位置。图中用小方框标注了提取样本的区域，用圆圈标识了微气候监测站的位置

© BayWa r.e., 编辑：Axel Weselek/
霍恩海姆大学

3.2 农业耕作与作物选择

农业光伏设施下的耕作与传统露天农业的耕种模式存在显著差异。差异主要体现在耕作模式（章节 3.2.1）、作物管理（章节 3.2.2）和农作物选择（章节 3.2.3）上。

3.2.1 支架和农业机械须适配

农业光伏设施的规划须考虑未来农业耕作的实际需求。规划要点包括：光伏设施的朝向应与耕作朝向保持一致，光伏设施支撑结构支架的间距应匹配所用农业机械的宽度和高度。特别是在项目早期阶段，农机操作员需要适应在支架之间作业。为防止设施遭到损坏，APV-RESOLA 项目中的光伏支架配有防撞护栏。黑格尔巴赫试验基地的研究结果表明，因支架和防撞保护措施造成的实际土地损失低于 1%。然而，由于在支架间进行机械化操作往往无法实现，Heggelbach 基地约有 8% 的田地因支架位置而无法耕作。若采用人工耕作或垄作，土地损失仅限于支架占据的实际面积。创新的斜拉索加固技术可以减少支架数量，从而实现耕地面积的最大化（章节 5.3）。精细农作和自动轨道引导系统也显著提高耕作的便利性。

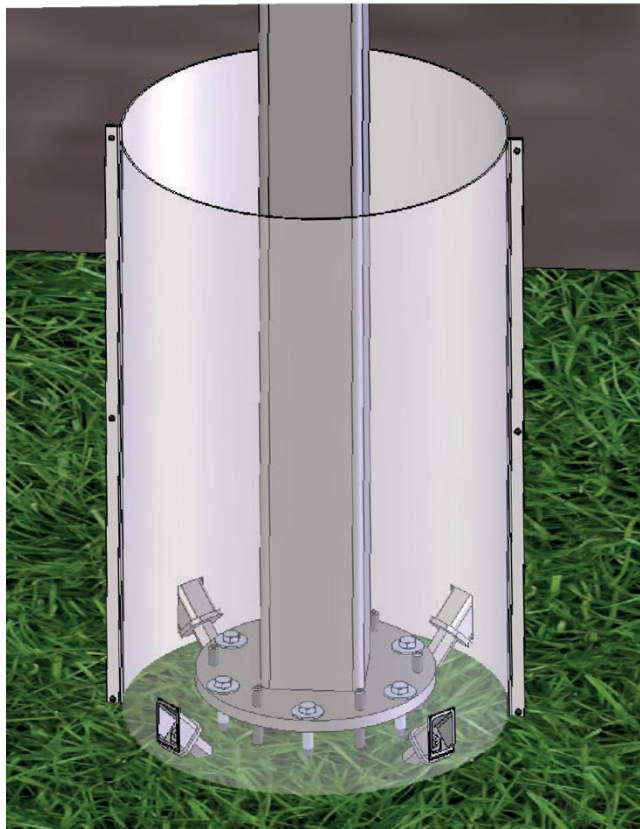


图 24: 黑格尔巴赫农业光伏设施高架系统的防撞保护，防止对农业机械造成破坏

© AGROSOLAR Europe GmbH

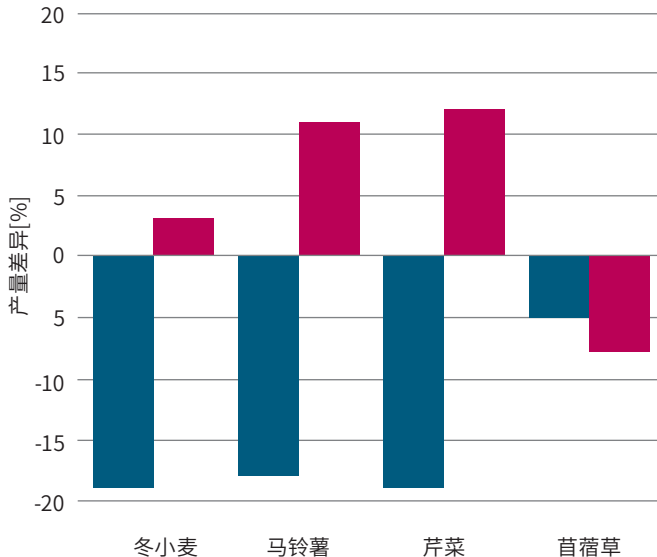


图 23: 黑格尔巴赫 2017 年（蓝色）和 2018 年（红色）农业光伏设施下方作物与参考地块相比的产量差异（不含因光伏设施支架造成的面积损失）

数据：霍恩海姆大学，图：弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

3.2.2 微气候的变化

在农业光伏设施下，光伏板对农田的遮阴会导致微气候发生变化。除了上文介绍的黑格尔巴赫研究项目之外，美国 [21] 和法国 [7] 的一些地方也做了关于微气候潜在影响的研究。研究人员发现，不同的光伏设施位置与设计方案会引起迥异的微气候变化。

APV-RESOLA 项目的研究结果可以总结如下：

1. 植物可利用的光照因技术设计（例如光伏组件的间距和朝向）差异而有所不同。在德国，耕地因遮阳减少的光照量不得高于大约三分之一。
2. 光伏设施支架高度越低，微气候的变化越显著。
3. 特别是在高温天气，光伏板遮挡下的土壤温度显著降低，空气温度则略有降低。
4. 光伏设施的朝向和设计决定了风速大小。因此，设施规划应考虑到风道效应及其对作物生长的影响。
5. 农业光伏设施的应用减少了土壤的水分流失。相较于未架设农业光伏设施的参考土地，气候越是炎热干旱，土壤水分的增加越显著。

此外，光伏板对土地的部分遮挡会导致光伏组件滴水檐所在区域的降水分布不均。为此，我们需要采取一系列措施，防止土壤侵蚀、表层肥沃土壤流失、苗木冲刷及表面水体富营养化等问题。本指南技术部分（章节 5.4）介绍了多种可行的方案。

这些研究发现对农业实践极其重要。因此，对于无防雨保护功能或防雨功能不全的农业光伏系统，在作物选择时必须考虑空气流通、湿度变化和真菌病感染风险的情况。还需注意的一点是：日照少、作物温度低会延长作物的生长周期。

了解农业光伏设施对微气候的影响，不仅对农业实践颇有助益，也是选择合适作物的基础和前提。

图 25：农业光伏苹果园的图示

© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所



3.2.3 适合的作物

根据目前的研究结果，几乎所有农作物都适合种植在农业光伏系统的下方。当然，遮阳会对农作物的收成产生不同程度的影响。耐阴作物尤其适合这种农耕模式，包括叶类蔬菜（如生菜）、饲料作物（苜蓿草）、各种核果和浆果及其他特殊作物（如熊葱、芦笋、啤酒花）。



图 26：法国跟踪型光伏组件的农业光伏设施

© Sun'Agri



图 27：农业光伏设施为树莓提供耐候性保护。荷兰 BayWa r.e. 公司的 300kWp 试验设施

© BayWa r.e.

永久作物与特殊作物

对于葡萄、水果和蔬菜种植业的特殊作物，农业光伏系统发挥了极大的协同效应。由于这些作物的单位面积产值高且通常较为娇嫩，它们对保护措施的需求也较高。农业光伏设施的结构设计如若合理，可直接保护作物免受强降雨、冰雹和大风的侵害。此外，农业光伏设施可结合其他保护措施，如防雹网和塑料大棚。此外叶菜类作物在农业光伏设施下的产量十分喜人。植物在遮阴约 30% 的环境下，叶片长势反而更好 [22]，这点与在 Heggelbach 试验中的芹菜生长情况类似。

气候危机带来的日照和温度变化对葡萄园中的葡萄产量影响尤为显著。强烈的日照会导致果实被灼伤、脱水。此外，增加的日照量会提升葡萄中的糖含量，从而提高酒精度，进而影响葡萄酒的质量。因此，部分遮阴在高温条件下有助于葡萄生长，并防止果实过早成熟 [23]。葡萄种植地上的农业光伏系统支架高度通常在两至三米之间（图 26），相较于其他农业用途而言成本更低。此外，农业光伏系统还可以整合既有的保护结构，这进一步降低了成本。在法国，农业光伏设施在葡萄园的应用正在获得越来越多的政策支持并付诸实践（章节 2.6.2）。

农业光伏设施在种植核果类作物（如苹果）方面同样表现出巨大潜力。为应对气候危机对苹果品质和产量的影响，常常需要投入昂贵的保护系统，而农业光伏设施可以有效降低这些成本。某些苹果品种只需要 60% 到 70% 的光照即可达到理想产量 [24]。弗劳恩霍夫太阳能系统研究所在莱茵兰 - 普法尔茨州的一座有机水果园内建造了农业光伏设施，用来研究光伏组件相较于传统防护措施对病虫害和产量的影响。在啤酒花种植中，农业光伏设施可以为啤酒花提供攀爬支架，这将大幅度降低啤酒花的设施成本。

在特殊作物中，灌木浆果的保护性种植也可结合光伏系统。在这种应用场景中，光伏组件在一定程度上起到了薄膜大棚的作用，同时可抵御雨水和冰雹的侵害。永久作物和特殊作物结合光伏系统后，在经济性（章节 3.3）、社会接受度（第 5 章）和合规性（第 6 章）方面展现出更大的优势。

耕地

黑格尔巴赫农业光伏基地的试验结果表明，农业光伏设施的遮阴作用有利于高温干旱地区有作物的生长。然而，在降雨充沛的年份，马铃薯、小麦及其他谷物（大麦、黑麦或黑小麦）的产量损失最高可达 20%。对玉米而言，由于其对温度和光照需求较高，在温带地区不适宜在遮荫条件下种植。对于其他作物，如油菜、甜菜和豆类，尚缺乏具体的实验数据。考虑到民众与农业的接受度，我们建议，减产比例不宜高于 20%。黑格尔巴赫项目的研究结果表明，适当的光照管理（降低光伏组件密度和调整组件朝向）和移动式农业光伏系统有助于降低德国的相关耕地作物降低产量损失。



图 29: 使用联合收割机的小麦产量
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所



图 28: 浆果种植示范项目的农业产量很高
© BayWa r.e.

牧场

农业光伏与牧业的结合在德国已十分普及。在这种混合农业模式下，人们往往仅注重光伏发电效率。相较于其他农业光伏的应用场景，牧场与光伏系统结合的协同效益较为有限，每块土地的农业产值也不高。目前尚缺乏具体的研究数据。

安装垂直农业光伏系统是一种新的解决方案（见图 31）。这种方法允许在近地光伏系统下继续从事农业生产。德国已经建成了两座试点设施，分别位于多瑙辛根（巴登-符腾堡州）和埃佩尔博恩-迪尔明根（Eppelborn-Dirmingen）（萨尔州）。这类方案在沿海地区等风力资源充沛的地区十分有利于植物的生长。因为光伏组件可以充当挡风板，帮助作物抵御风的侵蚀。

光饱和点

植物需要光照来进行光合作用，但不同植物在利用入射光方面的能力有所不同。当光强度达到一定水平时，植物的光合作用速率会趋于平稳，这一现象称为“光饱和点”（Lichtsättigungspunkt）。光饱和点是评估植物是否适合在农业光伏（Agri-PV）环境下生长的关键指标之一。超过这一光强后，植物无法将更多的光转化为额外的光合作用，甚至可能受到损害。因此，光饱和点较低的植物更适合在农业光伏设施的遮荫下种植 [21]。

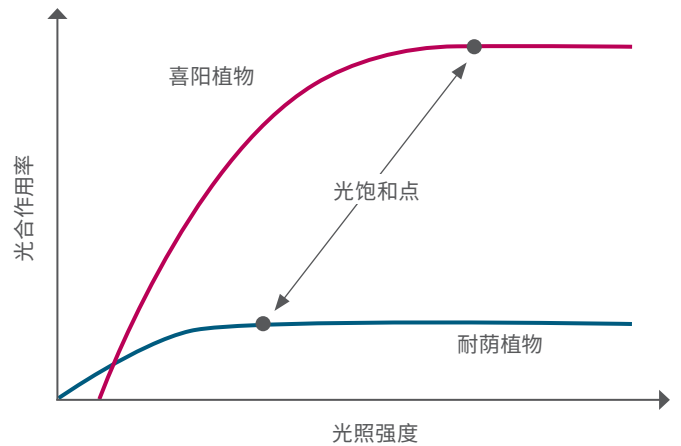


图 30：示意图：喜阳作物和耐阴作物与光照强度相关的光合作用率 [24]
© ASPs，编辑修改：弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

3.3 农场主的反馈

黑格尔巴赫当地的农场主大多给予了积极的经验反馈，但他们也明确指出了德国当前法律框架造成的种种限制。采访中，托马斯·施密特（Thomas Schmid）和弗洛里安·雷尔（Florian Reyer）讲述了自己选择农业光伏系统的原因，介绍了系统的实用性，同时对于某些法律规定的修改建议。施密特是黑格尔巴赫德米特农场社区（Demeter-Hofgemeinschaft Heggelbach）的联合创始人，该农场社区建立于 1986 年。他目前已经从农业一线岗位上退了下来，担任德米特协会的监事会成员，同时也是巴符州的一名顾问专家。雷尔自 2008 年以来一直是黑格尔巴赫农场社区的合伙人，负责可再生能源、技术及耕地和蔬菜种植领域。



图 31：萨尔州埃佩尔博恩-迪尔明根光伏园区内的垂直双面光伏组件，输出功率为 2MWp，建设方是 Next2Sun 公司
© Next2Sun GmbH

和施密特和雷尔的访谈

问：作为农场社区合伙人，是什么促使你们参与试点项目，提供土地做试验基地？

答：施密特：“十五年来，我们的农场始终有一个理想，希望在农业生产的同时也能实现能源自给自足。为此，农场对木材气化设备、屋顶光伏等例如进行了投资。2011年，当弗劳恩霍夫太阳能系统研究所找到我们的时候，能源转型已经是个重要的议题。在我们看来，农业光伏是我们为能源转型成功贡献力量的渠道。”

雷尔：“此外，我们对可再生能源领域的创新发展很感兴趣。”

问：规划和施工过程是否考虑到你们的各种诉求，比如土壤功能保护？

答：施密特和雷尔：“作为全程深入参与的合伙人，我们参与了所有规划环节，并在各方面参与共同决策。我们对于农业的需求和对土壤肥力的高要求从一开始就得到了重视。例如，在建设农业光伏设施过程中，项目方临时铺设了一条施工道路，并采用了特殊的锚固系统，避免了使用混凝土基础，以最大限度地保护土壤功能。”



图 32：托马斯·施密特和弗洛里安·雷尔。© AMA Film GmbH

问：你们在农业光伏设施下的耕作情况如何？

答：雷尔：“土地的双重用途可带来巨大优势，在这点上，这类方案是绝对可行的。种植方面的某些限制并不影响其整体的可行性。如果想做，就可以做。”

问：光伏发电给你们带来了什么好处？

答：施密特：“我们的目标是尽可能提高能源自给自足的比例，减少用能的成本。为此，我们正试图提高发电自用的比例，并在合作伙伴舍瑙电厂的帮助下，调整电力存储、控制和用电，从而匹配电力生产。”

问：如果现在再让你们做一次选择，你们是否还会选择建设这类设施？

答：雷尔：“作为研究设施会选择，但在目前的条件下则不会。”

问：为什么？农业光伏设施若要在实践应用中取得成功，需要改进什么？

答：雷尔：“重要的是前提条件。一切都要改变！”

施密特：“德国*目前还不具备相应的条件。因为架设了光伏设施，我们的土地无法再获得农业补贴。与此同时，我们生产的电力也无法享受德国《可再生能源法》的上网电价补贴。”

雷尔：“新技术的发展需要启动资金，以便能将新技术付诸实践。这里需要政策的支持。”

施密特：“此外，还需开展更多的研究项目，以便测试该技术在其他领域，例如啤酒花种植、水果种植以及常规农业中的应用情况。”

* 该表述涉及 2019 年的监管条件。一部分框架条件近期已做调整，请参阅第 6 章。

4 经济性与商业模式

农业光伏设施的成本因多种因素而异，包括装机容量、农业经营模式、地理位置以及所采用的光伏组件技术等。高架农业光伏设施的采购成本通常高于传统的地面光伏设施。这主要是由于光伏支架更高，工艺也更为复杂，光伏组件也需要定制生产。净空高度和支架间距在很大程度上影响支架的成本。使用小型农业机械，或是在尽可能多的工作步骤上采用人工模式，这两种做法都能提高经济效益。多年生垄作物也具有一定的成本优势，因为支架可安装在垄中，不会造成大比例的耕地面积损失。农田耕作须对作物采取保护措施，正是因此，从农场的角度来看，农业光伏系统的投资是有利可图的，这类系统具有节省成本的潜力。与传统的地面光伏设施相比，高架农业光伏系统一般不需要围栏，由此可节省这部分的成本。

高架农业光伏设施的运行成本略低于地面光伏设施，因为在光伏组件下进行的绿植修剪等工作已经包括在农耕本身的工作范围内了。只有无法耕作的狭长地块需要养护，以防止杂草蔓延。当土地租赁给他人时，农田的双重利用也会带来额外的经济效益。具体信息请参阅章节 4.1.2。

下文在估算成本时区分了永久性草地、耕地和园艺三种不同的应用场景，并将高架农业光伏设施成本与地面光伏设施及屋顶光伏做了比较。在园艺方面，包括水果和葡萄在内的永久作物，也包含小麦之类的特殊作物。下文仅限于对光伏层面做经济性分析，农业收入和支出未予考虑。在计算中，假设永久性草地采用近地农业光伏系统，耕地和园艺的应用场景则采用高架光伏系统。

结果表明：耕地上的农业光伏设施需要较大的装机容量，以保证农业光伏的经济效益。如果条件适宜，园艺也可采用较小的光伏系统。农业光伏系统的设计必须匹配所有轮作作物的需求或耕作方式。而对于永久作物而言，光伏设施的设计仅需在技术上满足单一作物的种植要求。永久性草地近地光伏系统的成本最低。

文中数字只涉及成本和收入估值。计算时未考虑新冠疫情和俄乌战争对钢材价格或组件价格的影响，以及由此产生的成本波动与供应瓶颈。

4.1 投资成本

投资成本的估算以两公顷大小的土地作为计算单位，屋顶光伏则以 10kWp 装机容量为考察单位。德国典型的耕地作物包括小麦、大麦和油菜，这类作物相较于园艺作物更需要光照。因此，耕地上太阳能组件的间距要更大，每公顷的发电量较低，假设为 600kWp。净空高度和光伏系统支架间距与黑格尔巴赫光伏设施的尺寸相同。若种植浆果等较矮的永久作物，可假设每公顷土地的发电量为 700kWp，净空高度为 3 米。永久性草地每公顷的发电量假设为 300kWp。

地面光伏设施的单位面积发电量则设为 1MWp/公顷。在此背景下，分别设定了一个乐观和一个保守的情景，以反映成本情况。在考察高架农业光伏的应用场景时，我们没有计算可能的风险溢价，以及为符合法律框架条件要求而需支付的额外成本。因此，文中数值是高架农业光伏上市的中期成本估算结果。图 33 显示了地面光伏设施和高架农业光伏设施在预期投资成本上的差异。

投资成本差异主要归结为三个成本核算单位：

1. 若光伏的安装高度较低，太阳能组件的大小或透光度需依据植物生长的需求进行调节，组件价格由此升高（章节 5.2）。若组件使用双面玻璃，案例计算中每 kWp 单位的平均价格增至 326 欧元。假设园艺所用的特殊太阳能组件价格为每 kWp 240 至 440 欧元。若采用价格较为昂贵的双面太阳能组件，其单位装机容量的发电量更高，抵消了高出的一部分组件采购成本。
2. 再来看高架光伏设施支架结构的价格，耕地应用场景中每 kWp 的平均成本为 372 欧元，地面光伏设施的单位成本则为 76 欧元。估算包含许多不确定因素，每 kWp 的成本可能在 243 至 500 欧元之间波动。永久性草地的光伏设施支架结构每 kWp 成本则介于 97 欧元至 167 欧元，明显要低得多。园艺光伏的相应成本大约为 243 欧元到 306 欧元。
3. 高架农业光伏设施架设场地准备和安装费用也显著高于地面光伏设施，耕地上每 kWp 相应成本预计为 190 欧元

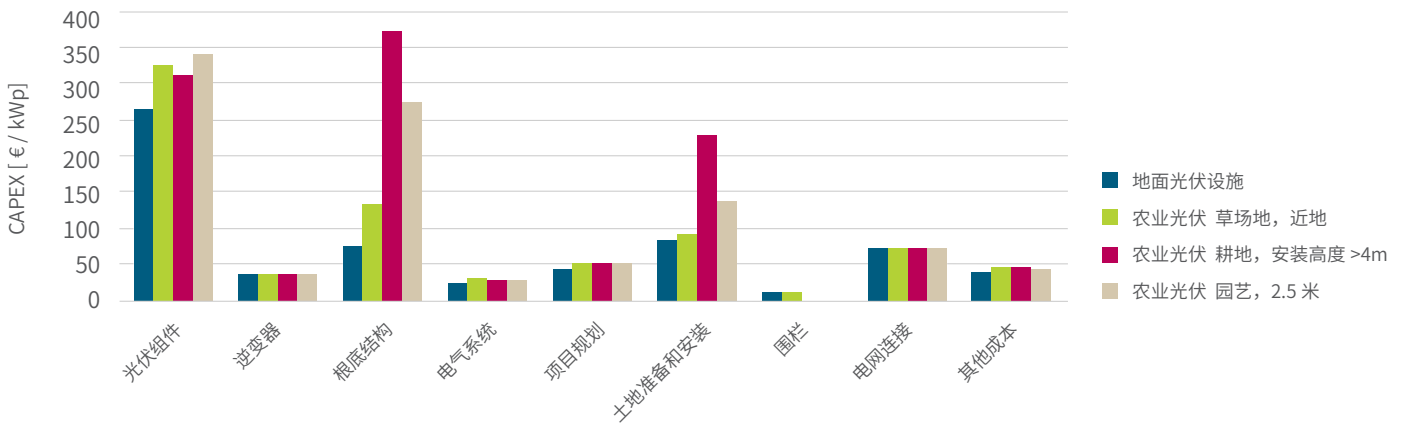


图 33: 地面光伏设施和农业光伏的投资成本 (CAPEX) 估算
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

到 266 欧元（地面光伏设施：每 kWp67 欧元到 100 欧元）。成本增加的因素包括土地保护措施与开辟施工道路的费用，以及因安装灵活性受限而造成的额外成本，这里必须考虑农业耕种时间与土地上的车辆可通行性。永久性草地和园艺农业光伏的场地准备与安装费用较低，每 kWp 的平均成本分别是 93 欧元和 137 欧元。

除了上述成本因素之外，高架农业光伏设施的逆变器、电气元件、并网和项目规划的成本大多与地面光伏设施的成本相当。若高架光伏设施不设围栏保护措施，也可节省一小部分的开支。

4.2 运营成本

农业光伏设施的成本取决于实际应用情况，个案之间的差别很大。与投资成本不同的是，相较于地面光伏设施，高架农业光伏设施运营成本较低。这主要归因于以下几个方面：

1. 在耕地和永久性草地的应用场景中，土地获取成本从每 kWp2 欧元下降至 1.3 欧元，园艺的单位成本降至 1.6 欧元。估算假设：农业光伏系统的土地成本与农地租赁价格一致，并由农业经营者和农业光伏设施运营商分摊用地成本。根据所有权结构和商业模式的不同，以上成本可能会有所差异。耕地的降本潜力可能更高，因为耕地租金大多低于园艺用地。
2. 当光伏结合了农耕后，可节省光伏组件下方的土地维护成本。

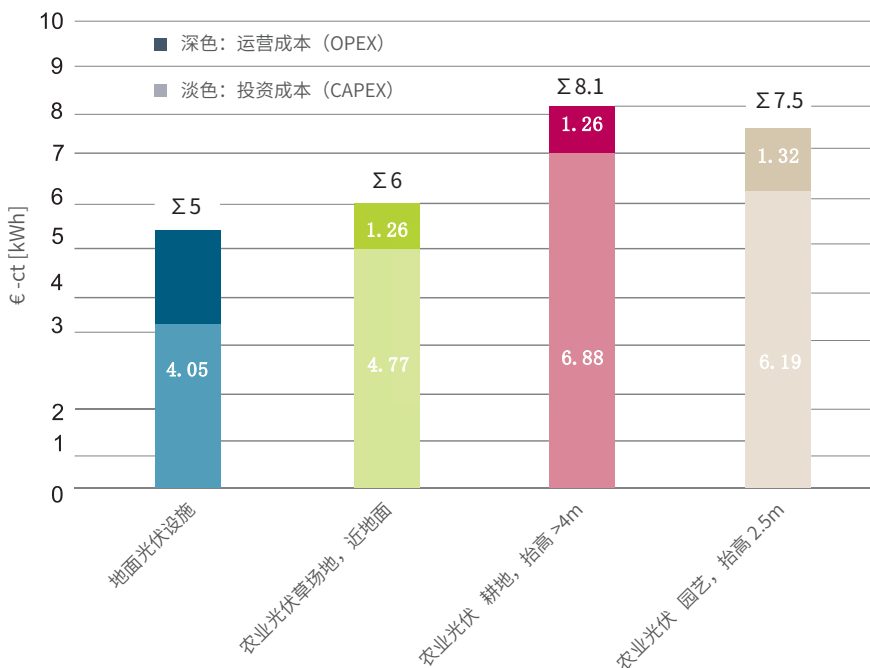


图 34: 发电成本估计
按投资支出细分 (CAPEX)
地面光伏系统与高架农业光伏的运营成本 (OPEX) 比较
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

3. 另一方面，如果光伏组件的安装位置较高，则须借助升降平台来完成组件清洁和设施维修的工作，这方面的成本预计将上升。鉴于德国降雨频繁，光伏组件的保洁费用到目前为止开销并不大。因此，这方面的成本增幅可控，预计增幅不大。在受污染较严重的地区，农业光伏组件的保洁费用占比可能会有显著的增加，增幅取决于所采用的清洁技术。至于肥料和农药对光伏组件支架的长期影响究竟如何，目前的研究仍然有限。

4.3 发电成本

研究表明，高架农业光伏设施在二十年运营期内的平均发电成本为每度电 8.15 欧分，比地面光伏设施的平均发电成本高出大约 50%。但高架农业光伏设施的经济效益优于小型屋顶光伏设施。永久性草地上的光伏设施电力生产成本较低，平均为每千瓦时 6.03 欧分，略高于地面光伏设施。图 35 对比了不同类型高架农业光伏设施与地面光伏设施的发电成本。

在进行成本估算时，并没有考虑到高架光伏设施的规模效应。当地块面积增加，高架农业光伏设施的规模也会相应扩大，因此高架光伏比园艺光伏更具成本效益。高架光伏的成本优势也一样体现在固定成本（例如规划和并网）上。随着设施规模逐步扩大，固定成本所占比例降低，总体的经济效应升高。当然，当农场发电自用的时候，小型设施也能显现经济效益优势。因此，监管框架应做相应的设计，设置额外的激励措施，以鼓励靠近电力消费者的地区建设分布式的农业光伏设施。

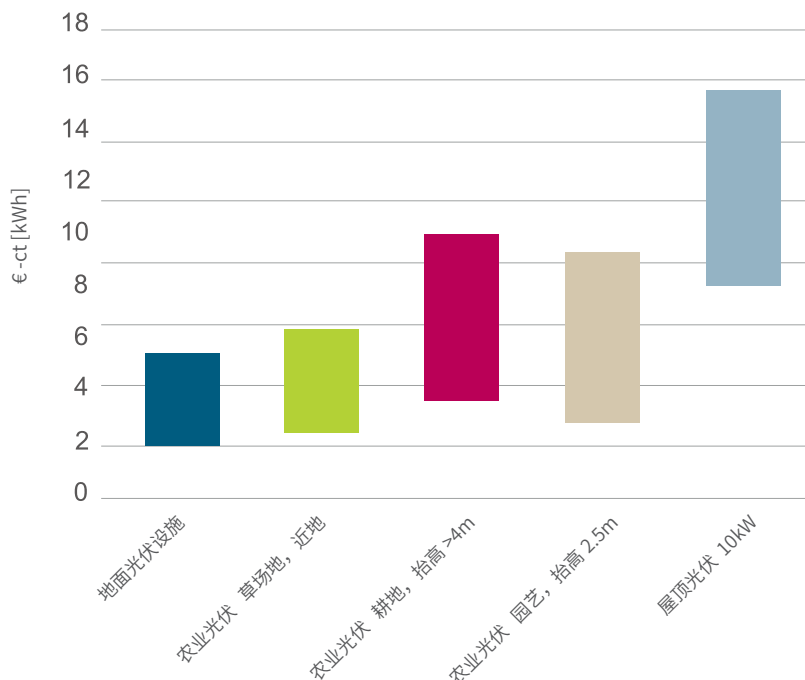


图 35：地面光伏系统和高架农业光伏的发电成本（LCOE）估算

© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

4.4 发电自用和电力收入

农业光伏电站的电力通常在自用时最为合算，这可直接降低外购电的比例。例如，当商业电价为每千瓦时 14 至 16 欧分 [25]（发电成本约为每度电 7 欧分）时，每度电可节省 7 至 9 欧分。发电自用的比例越高，用电曲线与发电曲线越相似，中午时分及夏季的负荷曲线达到峰值时，经济性就越高。因农业光伏系统的朝向不同，发电峰值可能会有所变化。

用电曲线可以借助储能设备将用电模式与电力生产进行匹配。电动汽车在为蓄电池充电时，也将影响到发电曲线的走向，提高发电自用的比例。

随着储能设备的成本逐步降低，这类设备结合适当的用电曲线后，能够产生经济效益。具体情况需具体分析。对于那些无法立即使用或存储的电力，必须找到买家。章节 7.1.3 介绍了享受《可再生能源法》上网电价补贴须满足的条件。

多家能源供应企业可就电力收购与光伏设施的运营商签订相应的电力采购合同。德国环境银行（Umweltbank）为地面光伏设施项目专门起草了供电合同模板。

4.5 商业模式

农业光伏系统包含了农业经营，其商业模式的设计往往比地面光伏设施更为复杂。项目实施过程将涉及多个参与方或职能领域。

职能领域至少涵盖以下四个方面：

1. 土地的提供（所有权）
2. 土地的农业经营
3. 光伏系统的提供（所有权 / 投资）
4. 光伏系统的运营

基本模式：“一站式服务”

最简单的商业模式莫过于由一家农业企业全权负责上述四个领域。这种模式适用于小型农业光伏项目。这些农业用地的经营者通常也是所有者，因此投资成本相对较低。该商业模式有一系列的优点：项目规划的成本较低，节省了合同谈判所需花费的人力物力。此外，由于农业生产与光伏发电归属于同一个单位，这有助于分析农业光伏系统的优劣势，因为农业经营和光伏发电两大领域可能存在相互影响。此外，不少农业企业通过安装屋顶光伏积累了光伏系统的运营经验，以上因素都有利于该商业模式取得成功。

理想情况下，农业企业应具备哪些条件？

若要确保农业光伏项目的经济性，我们须考虑以下几个因素：

- 确保良好的电网连接，毗邻电网，确保容量
- 垄作
- 永久作物
- 保护性耕作
- 机械化率低 / 净空高度低
- 连续的大面积土地 (>1 公顷)
- 坡度小
- 发电自用比例高，用电灵活（例如发电用于冷藏、干燥、加工）
- 有意愿且有能力投资

外部土地所有权

在许多情况下，土地可能并不归农业企业所有。这一点在德国的高租赁比例中得到了体现 [26]。如果另外三项职能仍由同一家农业企业一肩承担，这种商业模式一样能产生上文中所描述的协同效应。与地面光伏设施项目一样，当事人需要签订土地租赁和使用的长期合同，租赁期通常为 20 年。

外部光伏投资

针对大型农业光伏系统，农业企业作为光伏系统所有者的比例会下降，项目很有可能要依靠外部投资。投资方入股的方式能够激励农业生产与光伏发电的有机结合，实现对土地的双重利用。外来资金的占比越高，越是难以在经营中同时兼顾农业生产和光伏发电两者的利益。尽管如此，随着分工程度更为细化，项目有望优化其管理运营方式。

分担责任

以黑格尔巴赫试验项目为例，它的参与方十分复杂。土地所有权、光伏系统或设施所有权、农业经营和光伏设施的运营分属不同的机构。图 36 展示了该项目的合同关系基本结构，合同关系对这类项目十分重要。我们尚不清楚，哪种组合模式将在德国市场上取得成功，这主要取决于未来的监管框架。农民专业合作社模式也在可行方案之列。

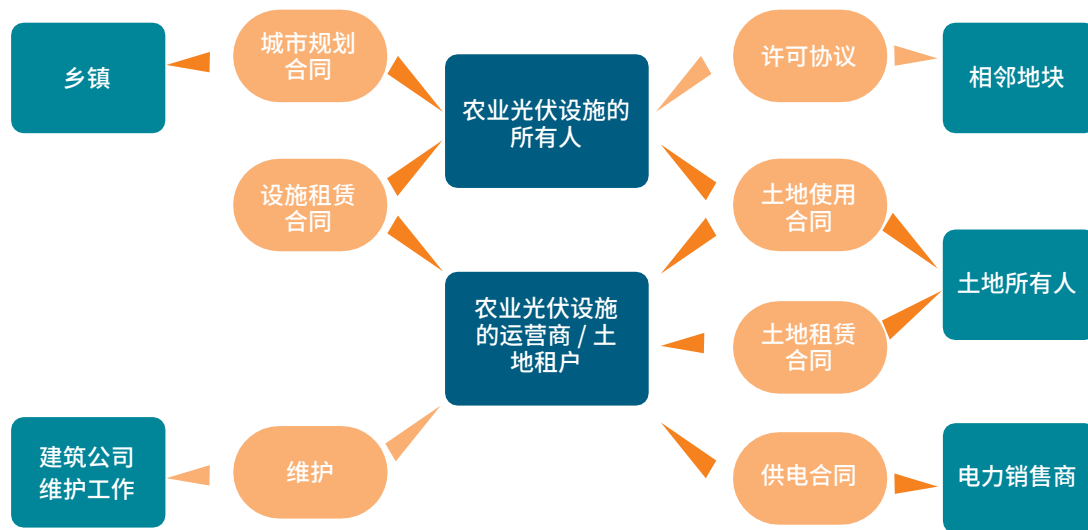


图 36: 利益群体和合同模式

表 06: 各类农业光伏项目的商业模式构成 (基于 Schindele 等人, 2019[5])

商业模式	功能			
	土地的提供	农业经营	光伏系统的提供	光伏系统的运营
1. 基本模式	农业企业			
2. 外部土地所有权	土地所有人	农业企业		
3. 外部光伏投资	农业企业		光伏投资者	农业企业
4. 只负责农业经营和设备运营	土地所有人	农业企业	光伏投资者	农业企业
5. 只负责农业经营	土地所有人	农业企业	光伏投资者	光伏运营商

5 技术

农业光伏设施的发电原理与传统地面光伏系统相同，但其结合了农业生产需求，因此在技术设计和设施高度等方面与传统地面光伏系统存在显著差异。无论是太阳能组件的技术选择，还是设施的高度、朝向、支撑结构和地基设计，都需充分考虑农业机械作业和作物生长的需求。此外，为确保土地资源的高效利用，合理的光照和水分管理对实现农田的高效产出具有关键作用。

在农业光伏系统的应用中，根据具体的农业场景，光伏系统的支架通常将组件安装在离地三至五米的高度（例如，啤酒花种植区域需高于七米），以确保联合收割机等大型农业机械可以在设施下方正常通行，植物也能获得足够的光照和降水。

光伏组件之间的行距通常大于传统地面光伏系统，这种布局减少了光伏设备的遮蔽面积至约原先的三分之一，从而保证农作物的光照需求。若配备光线追踪系统，光伏组件可根据作物的生长周期和光照需求动态调整，进一步优化光照效果。

此外，农业光伏系统的支撑结构及部分光伏组件设计亦不同于传统地面光伏系统。根据场地特性和农机作业需求，农业光伏设施可采用多种技术和设备配置。总体而言，农业光伏系统应采用先进的技术方案，并符合现行的法规和标准（详见章节 2.3 关于 DIN SPEC 的介绍）。



图 37：农业光伏设施下空间可供马铃薯收割机耕作
© 黑格尔巴赫农场社区



图 38：荷兰的光伏组件扩大了单体太阳能电池间隙且具有保护功能
© BayWa r.e.

5.1 农业光伏设施的结构设计方案

法国和日本的农业光伏系统多采用高架安装的方式，其净空高度是指支撑结构与最低结构件之间的垂直空间。下文将展示几种不同的设施结构设计方案。

高架光伏系统拥有巨大的协同效应潜力（见第 3 章）。为了确保光伏组件下方能够继续从事农业耕种，耕地上的光伏系统须首先解决结构和经济效益方面的挑战（见图 37）。

除了发电之外，光伏组件若要发挥保护功能，防止冰雹、雨水、夜间霜冻和其他极端天气事件对作物的损害，那么设施应配备特殊的光伏组件。图 38 展示了 BayWa r.e. 公司在果园上方架设的研究设施。该设施增加了组件单体太阳能电池的间距，为植物提供更多的光照，同时在屋顶结构中使用透明组件，进一步提升了保护功能。

近地面安装的光伏组件也能实现协同效应。Next2Sun 公司采用了垂直安装的双面光伏组件。这类设施的支撑结构离地高度较低，更具成本效益，但在光照管理方面的调节空间较为有限。近地设备的优势之一在于它有助于降低风速，从而减少蒸发，有助于维持农作物水分。

另一种设计方案是 TubeSolar AG 公司采用的水平架设的光伏管式组件。这种创新方案有助于光照与水分的均匀分布，尤其适用于没有人工灌溉系统的农业生产。Agratio 有限公司的光伏支架结合了这种新型的光伏组件与经济高效的斜拉索加固设计。

在“太阳能共享”的指导思想下，日本的农业用地上方多安装狭长的光伏组件，便于调整光照的强度与分布。此外，农业光伏领域还存在多种其他技术方案，每种方案各具优缺点，适用于不同的农业应用场景。

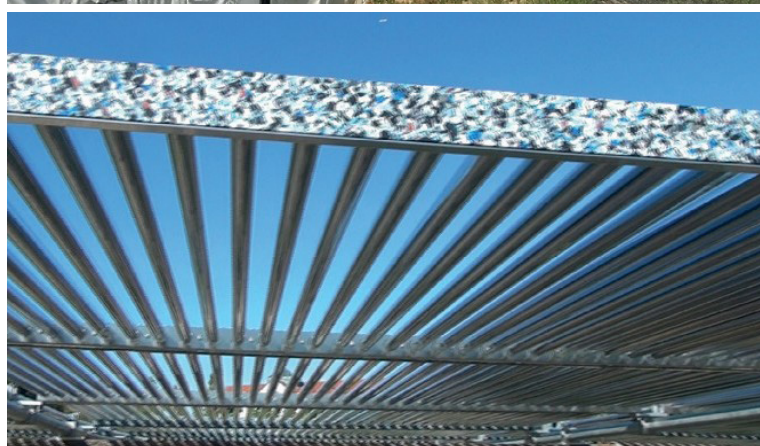
图 39：垂直安装的双面光伏组件，生产厂商为 Next2Sun 公司，埃佩尔博恩 - 迪尔明根
© Next2Sun GmbH

图 40：薄膜大棚上方的光伏组件
© BayWa r.e.

图 41：TubeSolar 公司生产的管状特薄型光伏组件
© TubeSolar AG

图 42：通过太阳能管实现部分遮阳，悬挂在 TubeSolar 公司的拉索之间
© sbp sonne GmbH

图 43：意大利采用窄幅光伏组件组成的农业光伏系统
© REM Tec



5.2 光伏组件技术

总体而言，各种类型的光伏组件都可以应用在农业光伏系统上。基于晶圆的太阳能硅电池组件占全球光伏市场的95%左右。这些组件结构的正面通常是玻璃盖片，背面是白色盖膜，中间层是不透光的太阳能电池。单个电池片间隔2至3毫米，层压后形成串联结构，外部金属框架则提供结构稳定性。

在农业光伏系统应用中，如果背侧采用透明背板（玻璃、薄膜），大部分的光线可以通过电池片间隙透过，使下方的作物获得充足光照。目前常用的光伏组件中，透光间隙约占组件表面积的4%到5%。为进一步提升透光率，可通过拓宽间距和采用夹具代替传统金属框架来增加透光面积。增加透光面积的组件既能保护植物免受环境影响，又不会遮挡其所需的光照。

双面组件能够利用背面射入的光线来发电，在适宜的辐照条件下，发电量的增幅最高可达25%。农业光伏的组件间距较大，离地高度较高，组件背面的采光一般优于传统的地面光伏设施。因此，双面光伏组件非常适用于农业光伏的应用场景。此外，双层玻璃结构的组件即使在玻璃破损的情况下，仍具有较高的承载能力，从而提升了通行和作业的安全性。

薄膜组件（如铜铟硒、碲化镉、非晶硅/微晶硅）可以采用柔性基底，可设计成圆柱形形态。相同结构下，这类组件每平米的重量比基于晶圆的太阳能电池要轻500克左右。但前者的能源转换效率较低。从单位面积成本来看，薄膜组件略低于太阳能硅电池组件。

有机光伏（OPV）具有类似特性。与硅基晶体类的光伏组件不同，有机光伏以有机碳化合物为基础，具有良好的光谱适配协调性、可柔性卷曲等特征，可以集成到柔性基材中。例如，在光伏薄膜大棚中，太阳光谱的一部分光线被传导至棚下植物处，供植物吸收利用。然而，有机光伏薄膜的局限主要在于两点：能源转换效率较低和耐用性较差。

聚光光伏（CPV）可借助透镜或反射将光线聚焦到较小的光敏表面上，一般需配备阳光跟踪系统（聚光能力较低的系统除外）。在聚光过程中，反射层通过光谱选择性仅反射特定波段的太阳光。目前，聚光光伏组件在农业光伏领域的供应商较少，瑞士公司Insolight是其中之一。



图 44：带有连续组件阵列的农业光伏系统

5.3 支撑结构和地基

5.3.1 支撑结构的建造方式

除了净空高度和作业宽度，农业光伏系统还须预留后期用于农业机械转弯的田边地。应用在耕地上时，土地和结构下缘之间的净空高度至少应有五米。这样的净空距离可以保证农业机械的可通行性，同时确保光伏组件下方较为均匀的光照分布。近地农业光伏设备的净空高度小，减少了钢材消耗，结构安全性的要求也随之降低，从而降低了支撑结构的投资成本。然而，随着光伏组件行距的明显增大，土地需求随之增加，使得农业光伏系统的单位面积成本上升，相对于发电收益的成本比例有所增加。

5.3.2 单轴和双轴跟踪系统

法国一些光伏设施安装了单轴或双轴跟踪系统。光伏组件的朝向可以根据太阳位置进行动态调整。在单轴跟踪系统中，光伏组件或根据太阳仰角在水平方向上进行追踪，或根据太阳方位角在垂直方向上进行追踪。双轴跟踪系统同时兼具上述两种追踪方式，从而实现光伏发电量的最大化。然而，在组件机台较大的双轴系统中，组件下方会形成核心阴影，而农田其他区域则完全没有遮阳。在不考虑购置及维护成本的前提下，追踪系统可以提高发电量并优化作物的光照管理 [27]（章节 5.4）。得益于灵活可调的倾斜角，追踪系统可以将设施调整至合适的朝向，从而优化对作物的保护，防止冰雹或暴晒对作物形成危害。



图 45：法国一座示范设施的单轴跟踪器系统

5.3.3 锚固和铺设地基

锚固或铺设地基旨在确保农业光伏系统的结构安全性。在设施建造的过程中，需提供遵守这类安全要求的证明（章节 5.7.2）。为了节省宝贵的农业用地资源，我们不鼓励采用混凝土地基。替代方案包括打桩或螺旋地桩，这类固定方式可确保设施拆除后不会留下任何残留物。

移动式农业光伏能够在不使用大型设备的情况下安装、拆卸、在他地重新组装光伏设施。其潜在优势在于：这种方式不涉及建造方式的变更，视具体情况，有可能无需提交建设申请。因此，移动式农业光伏非常灵活，适用于农业应用，同时也能够机动灵活地运用在危机地区。

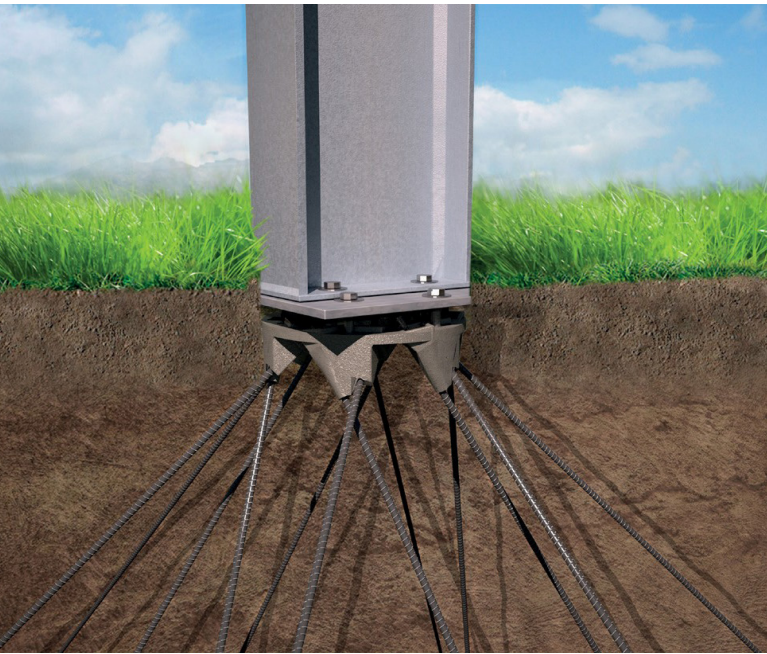


图 46：带锚板和螺纹杆的旋转地桩，用以固定地面上的安装系统
© Spinnanker GmbH

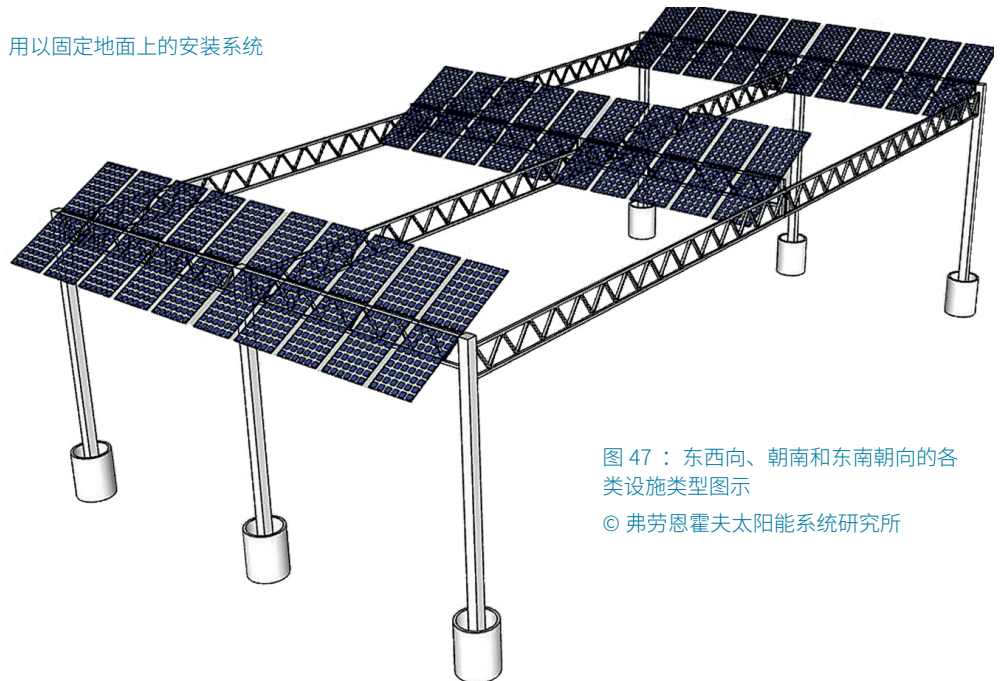
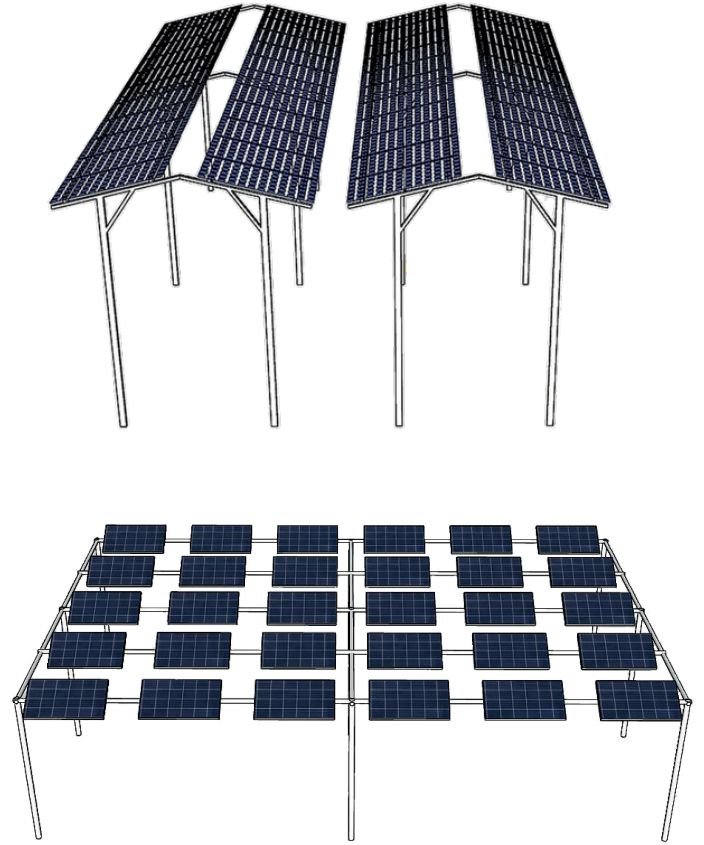


图 47：东西向、朝南和东南朝向的各类设施类型图示
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

5.4 光照管理

白天不同时间和一年四季太阳位置角始终在变化，农业用地的阴影面也随之发生变化。要确保植物的健康生长、农田的同步成熟，以及实现协同效应最大化的目标，我们应尽可能提高光照的均匀性。这可以通过以下几种方式来实现：

1. 模拟和测量结果显示，西南或东南朝向，与正南方向形成30度到50度夹角时，会产生均匀的遮阳效果。例如，黑格尔巴赫基地光伏设施的排布方向与正南夹角成45度，其发电过程中的损失率约为5%。实际朝向可根据设施所在地的条件调整。
2. 还有一种方案是保持朝南方向，使用更窄的光伏组件。该方案常见于日本的“太阳能共享”项目。
3. 东西向的光伏组件也能形成均匀的光照条件。在这种朝向的光伏设施下方，全天阴影面变化的幅度最大。为了避免完全不透光的固定式光伏组件下方出现核心阴影，组件阵列的宽度应明显小于设施高度。根据实践检验，净空高度的最小值应设定为组件阵列宽度的1.5倍。对于有追踪系统的光伏组件，其净空高度与阵列宽度的比值至少应设定为2。上述两种情况中，如果使用透光的光伏组件，比值可相应减小，具体数值取决于透光度的大小。
4. 配备单轴或双轴追踪系统的光伏组件也能实现针对性的光照管理，同时确保较高的电力产出。然而，如章节5.3.2所述，这类光伏组件的投资与维护成本相对较高。一般来说，组件机台大且带有双轴追踪系统的光伏设施不太适用于农作物种植的应用场景，因为这类光伏组件后方往往会出现核心阴影。而同一地块上的其他区域则始终完全暴露在太阳辐射之下。



图 48：光伏组件光伏组件的阴影条随太阳高度角移动
© 霍恩海姆大学

5.5 水管理

下雨时，雨水沿着光伏组件边缘滴落，这会导致土壤侵蚀或冲刷掉土壤。我们可以采取各种方法来避免上述情况对植物生长和土壤质量产生负面影响：与光照管理类似，窄条光伏组件或光伏管可以防止组件边缘积聚大量的水。光伏组件如果要兼具保护农作物的功能，我们可以借助光伏组件的追踪系统 [28] 或排出雨水，防止滴水下渗的情况发生。若采用雨水排水系统，绝大多数的情况下须安装灌溉系统以确保供水供应。特别是在干旱地区，收集和储存雨水有助于保障地下水供应，这也是农业保障最为基础的前提要件。

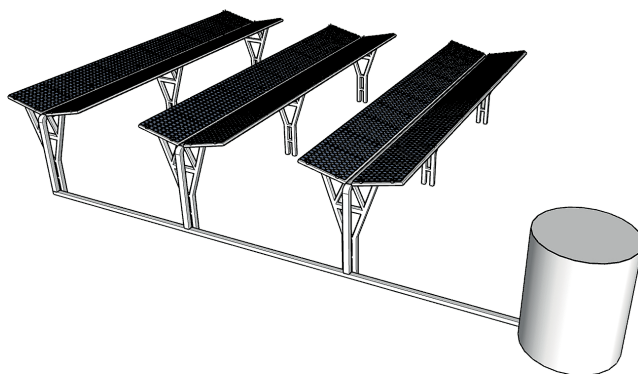


图 49：带储水容器的雨水收集系统方案。
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

5.6 光伏系统的规模

国际上应用的农业光伏设施规模差异很大。日本大多采用较小规模的光伏设备，装机容量介于 30 到 120kWp。中国则已建造了上百 MWp 的大型发电厂。除了经济效益、分布式发电和社会福利影响之外，项目成功与否的关键要素还包括文化影响及其社会接受度。德国究竟将选择怎样的发展之路尚未明确。此外，国内各个地区的发展也可能呈现差异化的发展趋势。德国南部地区的自然景观敏感，土地规模较小，比较适合建设小规模农业光伏设施，种植一些特殊作物。而德国北部和东部有着大面积的土地，比较适合在耕地上架设较大规模的光伏系统。这些地区的年日照量相对较低，规模效应有助于弥补经济性的不足。

农业光伏的用地需求通常比传统地面光伏设施高出 20% 至 40%。架高的农业光伏系统每公顷发电量为 500 至 800kWp，而传统的地面光伏设施每公顷发电量为 700 到 1100kWp，具体产量取决于系统的类型。近地农业光伏系统每公顷的电力产出只有 250 至 400kWp，其用地需求是地面光伏设施的三倍左右。



图 50：黑格尔巴赫农业光伏设施，占地面积约三分之一公顷，装机容量为 194 kWp
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所



图 51：埃佩尔博恩 - 迪尔明根光伏园区，安装了功率 2MWp 由 Next2Sun 生产的垂直光伏围栏
© Next2Sun GmbH

5.7 批准、安装和运行

高架农业光伏系统根据定义属于建筑类，通常采用玻璃/玻璃组件。一方面，欧洲针对光伏组件已经出台了关于安全资质的电气技术要求，即《低电压指令 2014/35/EU》（电气元件准入 IEC 认证）。另一方面，对于建筑中使用的玻璃，《建筑产品条例（EU）305/2011》中有相关的建筑产品规定。

相较于传统地面光伏设施，农业光伏系统需要在土地上进行农业耕作。因此，为了确保在玻璃/玻璃组件下作业的安全性，其规划、尺寸和施工都必须遵守德国的相关规定。这些规定体现在各个联邦州建筑技术条例的行政法规（VwV TB）中。此外，设施还需符合各联邦州建筑法规（LBO）对建筑产品可用性的要求。

建筑中使用的玻璃必须遵守特定的测试及设计标准，以确保玻璃产品达到要求的安全和防护水平。规则要求使用具备安全性能的玻璃（参见标准系列《建筑玻璃测定和结构设计规则 DIN18008》）。高架农业光伏系统的承重结构通常称为架空玻璃，人们通常需要在组件下面工作。若采用悬空玻璃，当玻璃发生破裂时，必须确保建筑仍有一定的承载能力，以防止造成严重损害和人身伤害。为此，应选择适当的产品，例如光伏夹层安全玻璃和合适的光伏组件框架结构。依据低压指令，可以从不同制造商处购买经 IEC 认证的玻璃/太阳能电池玻璃组件，将其应用在 DIN18008（德国工业标准 - 建筑玻璃）的监管范围内，这些产品须获得建筑产品和建筑类型的国家技术认证（AbZ）以及一般建筑设计许可（aBG）。

如果农业光伏系统在设计建设中不符合欧洲和德国的电气技术或建筑法规，则需向当地建筑主管当局申请安装许可，提供针对特殊建筑环境的太阳能组件可用性证明。此外，每一座农业光伏系统（包括光伏组件盖顶）都必须提供承重能力和适用性的证明，包括几何形状、坐落位置、系统自重和可能的气象影响，如风、雪和热负荷。还需确保外部因素可能引起的极端应力始终低于组件的承载能力，并保证农业光伏系统的自重和外部影响产生的负载能够通过支撑结构安全地传导至地基。

详情见手册：

“Allianz-BIPV_Techn-Baubestimmungen.pdf”，
免费下载地址：<https://allianz-bipv.org/>。

需要特别注意的是，本文介绍的内容仅是德国的一般情况。由于各联邦州可能存在不同的要求，在规划农业光伏设施时，应与相关建筑法规执行部门协商，了解和评估适用于具体项目的特殊规定和要求（例如项目相关的建筑许可）。针对具体项目，可能需要定制化的论证方案或采取特殊措施；如有必要，还需提交不符合当前法规的特殊申请。

德国的政策旨在推动能源转型。因此，德国未来可能会出台针对农业光伏设施的特殊豁免规定。这些规定将由各联邦州落实在本州的法律中（如《联邦建筑法》）。对上述发展趋势，我们拭目以待。

图 52：在太阳能组件下的农业光伏系统中工作
© Fabian Karthaus



5.7.1 农业光伏设施的审批程序

对于农业光伏设施建设项目，建筑许可审批流程具有的特殊要求。项目方需与技术合作伙伴密切合作，准备并提交审批所需的相关资料。表 6 概述了所需的许可证、鉴定和文件清单。

黑格尔巴赫农业光伏试验设施下方的农业用地被划为特殊使用区。尽管该土地继续用于耕作，但农业用地的补贴申请却遭到了拒绝。审批程序的详情见章节 7.1。

表 07：农业光伏的审批步骤概述

过程步骤	机构	备注
建筑许可	乡镇	用地规划和建设规划
所需鉴定	持证的鉴定师	环境、土壤和炫光评估定此外，风载试验
地役权登记（可选项）	土地登记局	例如，在公证处申请对施工通行权、所有权关系进行公证
保险	保险公司	在 APV-RESOLA 项目中，黑格尔巴赫试点光伏设施在上保险时享受了地面光伏设施的同等待遇。

5.7.2 农业光伏设施的建设（以黑格尔巴赫试验基地为例）

在农业光伏设施的项目规划和总体建设中，光伏企业通常负责整个过程的完成。当然，农业企业也可以与当地农场主合作，共同组织安装光伏设施。

技术合作伙伴负责建设、设施安装和运营相关的所有规划及流程。其中包括：

- 寻找合作机构来接收富余电力并将富余电力并入电网。
- 材料采购和物流规划
- 施工现场布置和土壤保护
- 设施构造
- 接线、避雷设施和监测方案
- 电网连接
- 技术维护和拆除复原

赫尔德旺根 - 舍纳赫（Herdwangen-Schönach）市议会召开听证会的六个月后，黑格尔巴赫研究项目提交了规划申请。一个月后，主管部门颁发了建筑许可证。获得建筑许可证的前提条件包括聘请一家独立的工程审计公司进行结构安全性复核。审计方还需完成土壤鉴定，以证明土壤的实际锚

弗劳恩霍夫太阳能系统研究所与项目合作伙伴一起制定了德国工业标准（DIN），将其作为质量基准，为项目招标、资助资格申请以及简化的规划流程提供依据（详见章节 2.3）。这些规范涵盖了电气、电子和信息技术协会（VDE）或德国技术监督协会（TÜV）等认证机构提供的农业光伏指数及其检测流程。

定能力。农业光伏支撑结构的设计也采纳了土壤鉴定结果以及工程公司提出的反馈意见。

在安装黑格尔巴赫研究设施时，项目方严格按照采购条例的要求，将各项订单任务分别委托给不同的企业执行。在整个建设过程中，项目方与黑格尔巴赫农场社区保持密切的联络，协调有序地开展工作。光伏设施安装了电力电子设备，并铺设了电缆，确保设施完工后能够迅速接入电网。



图 53：为避免土壤压实而建的施工道路
© BayWa r.e.

5.7.3 农业光伏系统的持续运营

由于光伏系统下种植了经济作物，设施也有一定的离地高度，光伏组件并不具备全天候的可及性。因此，维护和修理工作应安排在农业休耕期进行。同时，并非所有维修车辆都适用于农业用地。工人在光伏设施上作业时需确保自身安全。

农业耕种作业会产生扬尘，可能导致光伏组件表面污染。如果遇到强风天气或者土壤特别干旱的情况下，光伏组件被污染的可能性更大。因此，在这些不利气候和土壤条件下，应尽量减少或避免田间作业，以维护光伏组件的性能和清洁度。

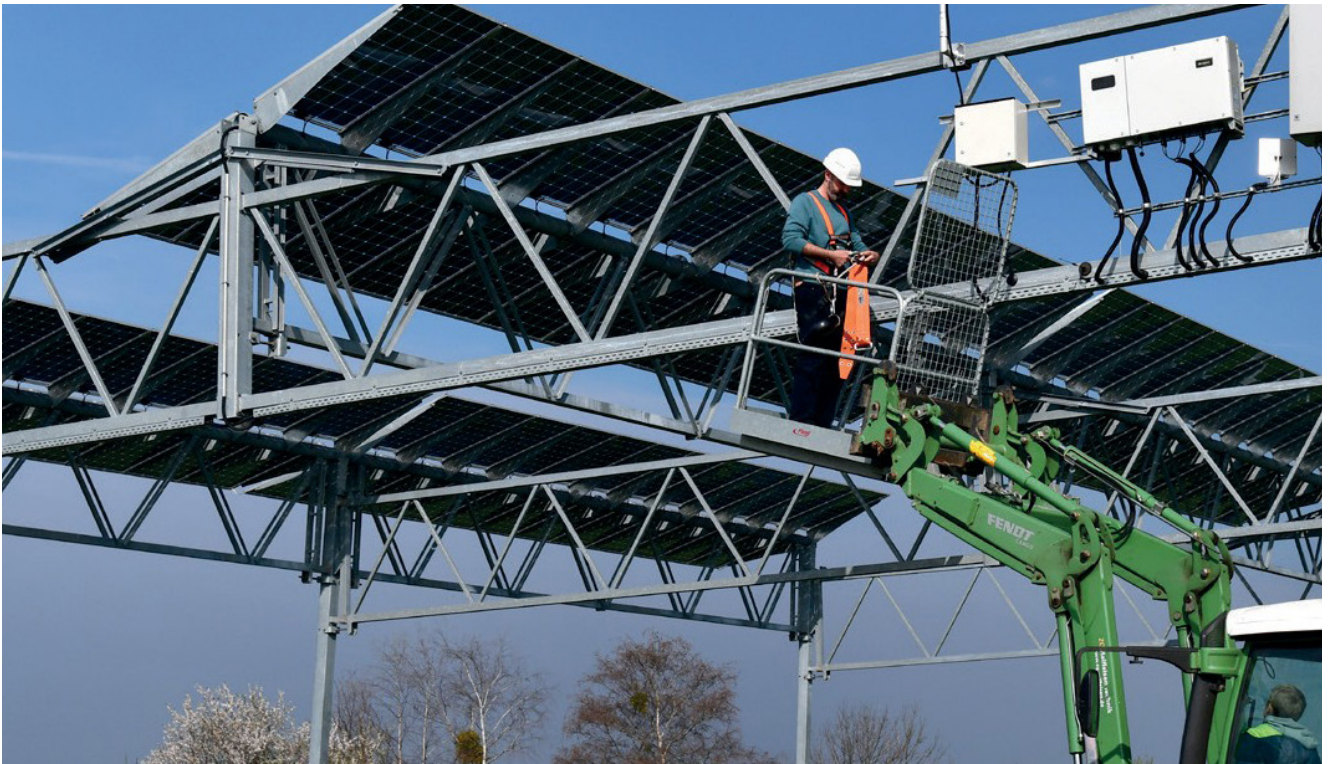


图 54：对黑格尔巴赫农业光伏设施进行维护
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

6 社会

要实现能源转型，离不开社会的广泛支持 [29]。民众对能源项目的态度通常分为两类：一种是对政策目标及措施的总体支持或反对，另一种是针对特定基础设施项目的具体支持或反对。德国联邦政府计划提升可再生能源发电的比例，尽管涉及不同技术，但整体上得到了民众的广泛支持。多年来的民意调查也显示出这一趋势 [30]，其中屋顶光伏获得了 92% 的支持率 [31]，而地面光伏设施的支持率为 74%，较前些年 80% 的支持率有所下降 [30]。

然而，即使符合规划法和市政政策的要求，可再生能源扩建项目在选址阶段往往会面临来自当地的冲突与阻力，导致项目进展受阻 [32]。地面光伏设施也常遭到当地居民的反对。民众的抵触情绪多集中于设施的外观、规模对景观的破坏，以及房产贬值的担忧。如果项目决策过程中未充分考虑公民利益和地方发展的因素，或未给予公众足够的参与机会，项目可能因缺乏社会认可而搁浅。因此，部分项目虽符合规划和政策要求，但仍遭到社会团体反对，这种情况并不罕见。相较于地面光伏设施，农业光伏系统因其“双重土地利用”的优势而受到更积极的评价，社会认可度较高。尽管如此，为了保障项目顺利推进，农业光伏项目在规划初期就应积极邀请各方利益相关者和公众参与，充分考虑地方的实际需求与发展优先级。在粮食生产、物种保护、景观保护、分布式可再生能源的发电与储存等可持续发展议题上，各方应努力达成共识 [29]。在地方层面，采用跨学科的方法有助于充分考虑不同群体的需求和偏好，合理平衡各方利益，减少社会接受度问题，从而推动地方能源转型 [33]。此举同时也激发了当地政府、企业和民众的投资意愿，可以为地区创造更多经济收益。

利益相关者对风险和收益的主观认识至关重要。部分群体可能会担忧项目的实施会带来土地利用方式或自然景观的变化，进而导致财务、健康或美学方面的负面影响 [34]。因此，投资者和项目开发商应及早制定沟通策略，确保信息透明，积极与各方沟通，争取利益相关者的支持和理解。

6.1 公民和相关利益群体的参与

农业光伏设施的运营涉及农业与能源供给等多领域的跨部门合作，因此，所有直接或间接参与方之间的沟通和协作

至关重要。在基础设施立项阶段，应规避和防止利益冲突，让地方民众和利益群体尽早参与进来。为保证公民和利益群体的有效参与，应建立明确的框架条件，使各方充分了解问题的症结所在，共同制定解决方案。项目目标的传达应明确透明，避免使利益群体产生任何误解。沟通过程旨在引导参与方重新审视自身行为、价值观和偏好的逻辑，并与利益群体达成共识。目标群体包括：对责任分配或决策机制感兴趣、有意愿在政策或财政层面参与项目的人士。此外，还包括寻找量身定制、易于实施且具备市场竞争力的解决方案的投资者和项目公司 [32]。在项目前期积极主动且全面地沟通有关信息是建立信任的重要举措，沟通内容包括规划中的设施情况、审批程序、投资者和经营者拥有哪些参与和共同决策的机会。究竟如何与利益相关方和公民进行有效的沟通，以及采用何种参与形式，这些方案必须根据具体情况来决定，也取决于行动方的组成、各自关注的话题和领域。总体而言，越早开展积极的沟通和对话，项目成功的可能性就越大，同时也有助于解决和澄清有关公民参与的问题。

6.2 特定背景下的社会接受度

农业光伏项目的社会接受度受到多重因素的影响。这些因素虽不直接涉及技术层面，但它们影响了社会接受度的形成过程以及民众对项目的评价。主要因素包括技术的应用方式、社会和法律环境、自然空间的特点与关联（如自然、文化、社会、农业经济等），以及社会政治和规范框架（如指导原则、公民参与文化与经验、参与者的可信度等）。

在种植特殊作物和多年生作物的区域架设农业光伏设施，往往比在普通耕地上建设更易被接受。这是因为前者的设施规模通常较小，净空高度较低，对视觉景观的影响较小。此外，薄膜大棚和防雹网等也会对自然景观的视觉美感产生一定影响。在这些特殊区域上架设农业光伏设施，带来的额外益处更能提高社会支持率。农业光伏系统的多重优势助益了农业生产：农业光伏设施提供的遮阳效果可减少作物的热应力，降低病虫害的危害和化学杀虫剂的用量，防止水土流失，利用可再生绿色电力进行灌溉，可提高生物多样性，即便在极端天气条件下（如热浪和冰雹）也能保证较为稳定的产量。强调和展现上述优势对提高利益群体和民众对农业光伏系统的接受度起到了至关重要的作用。

6.3 对话与公民参与的两个案例

6.3.1 APV-RESOLA 研究项目

卡尔斯鲁厄理工学院（KIT）技术影响评估和系统分析研究所（ITAS）开展的 APV-RESOLA 项目旨在通过早期介入了解公众对农业光伏系统的意见和看法，从而识别潜在障碍，明确项目成功的必要条件。这项研究的重点是通过探索社会接受度的前提条件，回答关于可持续分布式能源供给的前瞻性问题，并确定符合社会认可的农业光伏系统设计。尽早引入公众和利益相关方，加强彼此间的交流，有助于加深在利益、价值观和偏好方面的相互理解。

在博登湖地区的黑格尔巴赫公社，APV-RESOLA 项目实施了跨学科、多阶段的研究流程。该地区依据迪米特法则（Demeter-Richtlinie）进行生物动态耕作，并在耕地上架设了试点光伏设施。项目组选择在不同时期让公民和利益相关方通过多种形式参与，逐步推进对农业光伏的社会认知和评价。项目伊始，研究团队举办了一场信息交流会，随后向规划设施区域内所有 18 至 80 岁的居民发出参与研究的邀请。在设施建设前，研究团队与感兴趣的群众进行了开放式的头脑风暴，围绕模型深入探讨农业光伏的潜力和挑战 [33]。在讨论中，各方一致认为，有必要评估农业光伏对地区粮食生产、自然和人文景观的影响；项目选址应在城镇层面进行，并结合当地特点做出决策，充分考虑设施规模和集中度的特殊需求 [34]。第一次公民讨论结束后，项目方安排了对试点设施的考察活动，并在试点设施揭幕时开展了民意调查。设施运行一年后，首次研讨会的参与者再次受邀参加第二次讨论，旨在分析其态度的潜在变化。在第二次研讨中，部分参与者再次表达了反对态度，认为光伏设施破坏了自然景观的和谐美感。“我对这类设施完全不感兴趣，感觉它们就像是景观中不和谐的庞然大物。如果只是试点设施的规模，我尚能接受。”



图 55：APV-RESOLA 项目的公共宣传活动
© 技术影响评估和系统分析研究所

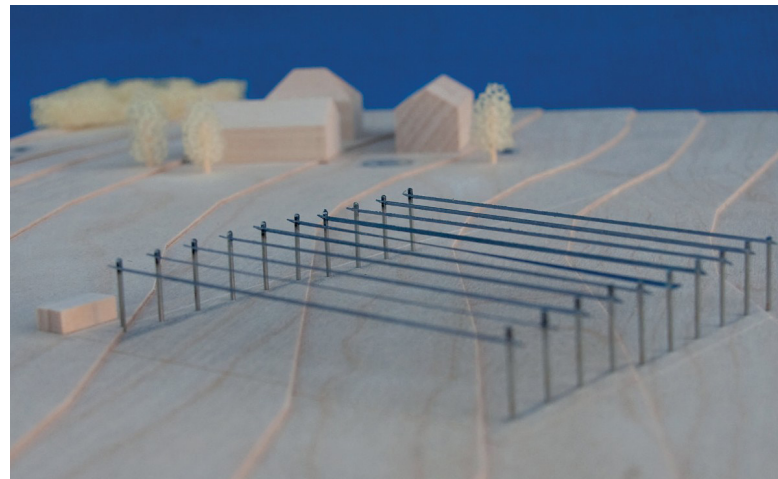


图 56：黑格尔巴赫项目宣传活动中陈设的光伏设施模型
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所

部分参与者在考察设施后感到惊喜，他们的最初顾虑逐渐消散。“站在这些光伏设施下，我并不觉得它们笨重，相反，它们显得轻盈且通风，看上去并不像典型的工业设施。”大家普遍认为当前用于评估设施影响的时间过短，认为“需要数年才能真正观察到农业光伏设施的正面或负面影响。”

在第二次公民讨论中，参会者共同制定了农业光伏设施选址的甄选标准，涵盖了限制性规定（限制或阻止应用的因素）和优先性标准（支持应用或创造应用条件的因素）。根据这些标准，大家在博登湖地区的赫尔德旺根 - 舍纳赫镇选定了适宜农业光伏建设的具体地点。此次模拟规划不仅让参会者探索了复杂的背景关联，也在贴近实际的环境中验证了所定标准的有效性（参见图 57）。活动最后总结了针对地面

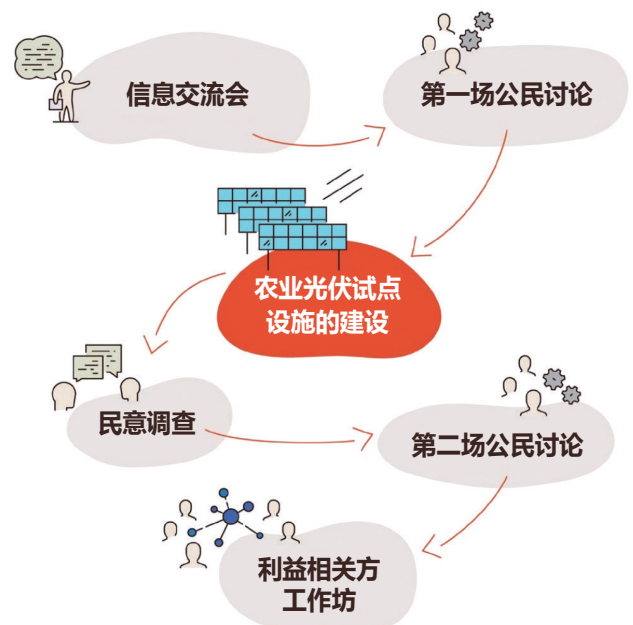


图 57：超学科多级的农业光伏研究方案
© 技术影响评估和系统分析研究所

光伏和农业光伏设施用地的政策建议：“必须出台规定，禁止向能源供应商收取高额土地租金，还应确保这些光伏设施的下方继续从事农耕。”活动还确定了项目的核心成功要素，其中包括提供本地储能方案，以充分利用所发电量并提升资源效率（详情见章节 6.4）。“没有储能设备，就没有建立光伏设施的必要。这是最大的问题：储能方案。一旦有了储能，项目就可以顺利进行。”

在与利益群体代表召开的研讨会中，大家讨论了第二场公民研讨会的成果和行动建议。参会人员包括技术开发企业、能源产业、能源公社、地区政府代表，农业、自然保护和旅游业的代表，以及公民推选的代表。

决定光伏园区或农业光伏用地的关键在于建立透明的、符合相关标准的候选地点清单。“不能将乡村地区视作城镇地区廉价能源的供应商。需明确哪些区域适宜光伏建设，哪些不适宜。斜坡和生物多样性是否影响选址？慎重的选址可避免类似沼气厂无序扩张的问题。”早期的积极沟通、透明公开的项目规划以及当地民众的深度参与至关重要。“只有当公民切实深入参与，光伏项目才有望真正成为民众的项目，从而获得更广泛的支持和成功的可能。”同时，居民们对项目的规模表达了担忧，担心过大面积的设施会破坏他们熟悉的自然和休闲景观。”

6.3.2 水果种植农业光伏研究项目

在莱茵兰-普法尔茨州阿魏勒县，水果种植与农业光伏的结合研究项目是早期邀请利益相关方参与决策的成功案例。农业光伏作为一项技术创新，若想获得成功，必须赢得包括公众和项目各方在内的广泛支持。项目的定性分析旨在总结影响农业光伏接受度的正面和负面因素，从而深入了解各方意见。因此，项目在建设农业光伏研究设施的同时，还对当地行政部门、能源部门、环境与物种保护组织、农业部门、农业协会、地方政策和学术界的代表开展了意见调查。访谈问题包括：受访者对水果种植农业光伏项目的了解程度、对农业光伏的评价、以及对该技术带来的机遇、挑战和未来发展前景的预测。

尽管采访对象属于不同的利益相关方，但大部分受访人员对果园架设农业光伏设施的做法持积极支持的态度，认可其发展潜力，并对研究项目表示肯定。访谈结果表明，农业光伏的接受程度在很大程度上取决于地区条件。在水果种植农业光伏研究项目所在的地区，多年以来，薄膜和防雹网在水果种植业中已经得到了广泛运用。当地人对作物上方架设设施的情况并不陌生，对农业光伏这类技术型建筑的审美评价因此相对正面积极，尤其当这类项目还能产生协同效应时。农业光伏系统兼顾粮食和能源生产，既能为农户带去经济利

益，也具有积极的环境效益，其中植物保护功能尤为农户看重。另一方面，社会接受度的负面影响因素也不容忽视，主要包括以下几个方面：农业光伏设施在经济性上存在不确定性，且如何将其与现代农业管理有效结合仍不明确。此外，现行的法律框架也不利于农业光伏的发展。物种和环境保护主义者还担忧农业光伏可能对生态环境带来不利影响。基于当地的评估结果，项目方依据阿魏勒县的情况，有针对性地针对不同利益群体制定了沟通方案。虽然这类研究项目得出的结论基于特定的区域和背景条件，但研究所获的结论和沟通方案却可以成为未来项目的参考模板。

6.4 成功要素

APV-RESOLA 项目框架内的跨学科研究总结了以下有助于提高农业光伏社会接受度的成功关键因素。这些要素在水果种植光伏项目的发展中也得到了证实：

扩建战略

1. 在为农业光伏设施选址之前，应优先利用屋顶、农业建筑物和停车场的光伏潜力。
2. 农业光伏设施的建设位置应能通过土地的双重利用形成协同效应，例如光伏设施的遮阳效果降低了热浪对农作物的负面影响，或者光伏发电用于满足作物灌溉的用电需求，抑或是运用了电气化、未来可自动运行的系统，从而走上了数字农业的发展之路。

粮食和能源的协同生产

3. 农业光伏设施下从事粮食生产时，应避免单方面优化发电性能，避免在光伏组件下从事“伪农业生产”。
4. 这些光伏设施应整合到分布式的能源供应体系中，将所生产的电力用于自身的能源消耗，或用于有更高附加值的生产环节中，例如灌溉、冷藏或农产品加工。
5. 光伏设施应结合储能系统，以提高资源效率，使当地的电力供给与需求相匹配。

融入自然和人文景观

6. 设施的规模和密度应受到限制，类似于风电设施，农业光伏设施与居住区之间应保持合理距离。同时应考虑场地的特性和社会偏好，合理控制农业地区光伏设施的安装数量，依据区域空间规划确定项目审批条件，例如限制建筑覆盖面积。¹

1 德国《联邦建筑法》（BauNVO）中常见的建筑区域类型。

7. 农业光伏系统不得损害休闲设施及自然景观的质量。应优先选择具有自然屏障的场地（例如林带边缘地区或平地），确保光伏设施能在最大程度上融入自然景观之中。

生态贡献

8. 无法从事农业耕作的光伏设施中间地带可以作为土壤侵蚀防护带或走廊生物区，以保持或提高农业的生物多样性。

为了确保农业收益，法规也应明确规定对农业光伏设施的具体要求。这里可以参考 DIN SPEC 91434 的关键参数和检测程序。

“1000 块土地计划”可以成为农业光伏的另一项资助方案：类似于 20 世纪 90 年代针对光伏系统的“1000 个屋顶计划”，我们可以建立一个有针对性、系统性的资助计划，充分考虑近地及高架农业光伏系统在园艺 / 永久作物、耕地和光伏温室等应用场景中所面对的具体挑战和资金需求。配套的科学测量与评估方案可为未来法律框架条件的设计提供必要的数据基础。



图 58：无法从事农业耕作的中间狭长地带可以用在农业光伏系统中，用来提高农业用地的生物多样性

7 政策与法律

由 Becker Büttner Held PartGmbH 律师事务所
林业经济学法学硕士 Jens Vollprecht 先生编写

德国致力于在 2045 年前达成碳中和目标，即实现温室气体净零排放，并在 2050 年后实现温室气体“负排放”。这一宏伟蓝图在由社会民主党 (SPD)、联盟 90/绿党 (Bündnis 90/Die Grünen) 与自由民主党 (FDP) 共同签署的联合执政协议中得到了明确体现，协议中特别指出，到 2030 年，德国须确保 80% 的电力供应来自可再生能源 [2] 为实现这一目标，光伏发电装机容量的大幅增长势在必行，预计需达到 500 GWp 的规模，这标志着相比当前光伏装机需实现近十倍的增长。鉴于地面光伏设施在成本效益上的显著优势，大部分的光伏扩建项目将优先选择此类形式进行部署。

然而，地面光伏的扩建与当前减少用地的政策形成冲突。减少用地的政策目标设定为：到 2030 年，住宅用地和交通用地的新增量应减少到每天 30 公顷，并力求在 2050 年实现此类用地零增长的目标。此举不仅旨在维持土壤的肥沃性，更关乎国家粮食安全的长远考量。当前，德国每日新增的住宅与交通用地已高达约 56 公顷，面积之广足以覆盖 79 个标准足球场。

农业光伏作为一种创新的土地利用模式，正逐渐成为推动区域碳中和及气候友好型发电的重要力量。然而，受制于当前法律框架尚未健全，德国在可预见的未来内对农业光伏经济性的保障显得尤为困难。

在农业与能源这两个受到严密监管的行业中，农业补贴政策的制定、审批流程的规范性以及《可再生能源法》所确立的上网电价机制，均对农业光伏项目的经济性具有举足轻重的影响。鉴于农业光伏作为一项新兴技术，当前尚未能充分展现其规模效应所带来的成本优势，因此，在与已趋成熟的传统能源技术竞争时，其经济竞争力面临一定挑战。

为深入探索农业光伏的潜力并推动其技术进步，德国不仅需要加大对农业光伏科研项目的投入，还需积极建设贴近市场需求、具备可操作性的试点项目。这些项目将成为农业与光伏企业合作的桥梁，共同探索农业光伏技术的社会接受度、经济可行性以及多样化的应用场景。在此过程中，德国可以积极借鉴法国等国际上的成功经验，通过创新融资机制，为农业光伏项目提供必要的资金支持，进一步促进其发展。

以下是对德国当前最为关键的法律框架条件的简要概述。鉴于篇幅所限，我们无法对所有相关法律问题和案例进行详尽探讨。在实际操作中，针对具体个案，应进行深入细致的

考察与分析。此外，值得注意的是，由于农业光伏领域的许多新兴问题尚未有明确的法律先例可循，因此，在处理这些问题时可能会面临法律不确定性的挑战。鉴于此，建议在规划农业光伏项目时，务必先期进行专业的法律咨询。

7.1 共同农业政策直接支付条例

在欧盟的农业政策框架下，农业用地直接获得资助是一项重要政策。关于焦点问题——在农业用地上架设光伏项目是否会影响其申领补贴的资格，德国《共同农业政策直接支付条例》(GAPDZV) 等法规明确遵循了欧洲共同农业政策。该条例指出，若农业光伏项目得到妥善规划与实施，则不会剥夺农业用地享受补贴的资格。

具体而言，GAPDZV 第 12 条第 5 款第 1 句定义了此类农业光伏项目²：依据 DIN SPEC 91434:2021 标准，此类项目是指在农业用地上建设的太阳能发电设施，这些设施需不影响传统农业方法的实施、机械与设备的正常作业，且农业可实际利用面积的减少不得超过总面积的 15%。符合上述条件的项目，其余 85% 的土地仍可继续获得补贴。³

此规定有效消除了以往政策中的不确定性，明确指出单纯因土地上安装了光伏设施而全面剥夺其受助资格的做法并不符合欧盟法律。相反，只要光伏设施的运行未对土地的农业用途构成重大障碍，该土地仍具备申领补贴的资格。⁴ GAPDZV 第 12 条第 5 款第 1 句第 1 项也有所体现，如农场在土地上放牧羊群被视为“使用正常农业方法在土地上耕作”的实例。在多数情况下，尤其是采用高架光伏设施的农场，受损土地面积往往远低于 15% 的界限，因此农场主若能提供相应证明，其超过 85% 的土地面积便有望获得补贴。

为明确这一点，GAPDZV 第 12 条第 5 款还补充了第 3 句：“若经营者能够依据 DIN SPEC 91434:2021 标准证明，该设施导致的农业不可用面积占比低于 15%，则受助资格的面积将按第 2 句之规定相应增加。”此修订进一步细化了政策执行标准，确保了农业用地在可持续发展与能源转型之间的平衡。

2 参见《共同农业政策直接补贴条例》第 12 条第 4 款第 6 项。

3 参见《共同农业政策直接补贴条例》第 12 条第 5 款第 2 句。

4 详见 Vollprecht/Kather, IR 2022, 232 (233)。

7.2 公共建筑法的要求

根据建筑法规的规定，农业光伏系统因其结构性特征，通常被归类为需要建筑许可证的设施。在申请过程中，若项目能够遵循并满足所有公共法律条款的要求，则有望获得建筑许可。值得注意的是，即便是那些在法律上被认定为无需单独许可的设施，也必须确保完全符合公共法律的相关规定。

在这些必须遵守的公法规定中，《联邦建筑法》(BauGB) 占据了核心地位。具体而言，无论是针对室内区域（参照《联邦建筑法》第 34 条）还是室外区域（参照《联邦建筑法》第 35 条）的农业光伏系统建设，能否成功获得建筑许可，关键在于项目设施是否符合《联邦建筑法》所界定的适用范围（具体参见《联邦建筑法》第 30 条）。这一规定确保了所有农业光伏项目的规划与建设，都能够在确保公共安全、环境保护及土地资源合理利用的前提下进行。

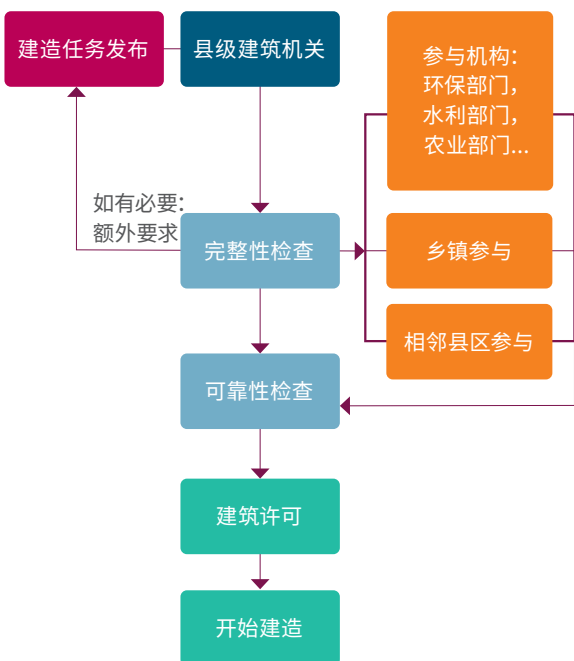


图 65：建筑许可程序示例

7.2.1 《联邦建筑法》界定的适用范围外的项目

若光伏设施不在《联邦建筑法》的适用范围内，则其合法性的评估需依据室内或室外安装的具体规定进行。鉴于农业光伏项目普遍位于室外，本节将聚焦于探讨《联邦建筑法》第 35 条的相关规定。

根据最新修订的《联邦建筑法》第 35 条第 1 款第 1 项第 9 项，农业光伏项目享有特殊优先权，前提是安装的设施必须满足《可再生能源法》(EEG 2023) 第 48 条第 1 款第 1 项第 5a、b 或 c 项所规定的特殊光伏设施要求。这一条款强

调了德国联邦网络管理局 (BNetzA) 及 DIN SPEC 标准在评估中的重要性。⁵ 此外，项目还需在空间布局与功能上与《联邦建筑法》第 35 条第 1 款第 1 或 2 项所规定的农业或林业经营方式保持一致，且特殊光伏设施的占地面积上限为 25000 平方米，同一农场或光伏设施运营场所内仅能安装一项此类设施。

《联邦建筑法》第 35 条第 1 款第 1 项第 8 项 b 子项进一步为位于高速公路或铁路网沿线的太阳能项目提供了优先权，特别是当光伏设备位于这些交通干线固定路基外延 200 米内的区域时。由于农业光伏项目属于利用太阳能的设施，它们在此类情况下自然符合优先项目的条件。

农业光伏项目若分布于不同区域，可能需要提供更多证据以证明其符合优先项目标准。然而，根据项目设计的具体情况，还须满足其他优先权条款。

享有优先权的项目是指为农业或林业经营服务的项目，通常只占农场面积的一小部分。（参见《联邦建筑法》第 35 条第 1 款第 1 项第 1 项）

《建筑用地法》第 201 条明确了“农业”定义，其中特别需要关注“服务”功能。一般来说，设施发电主要用于自给且与农业生产所有空间上的关联，便符合“服务”功能。⁶ 就设施的总容量而言，农场自用电力应明显高于并网电力。德国联邦行政法院 (BVerwG) 规定，农业生产中使用风力发电设施所产生的约三分之二电力可视为符合该要求。⁷ 考虑到气候变化及农业、林业或园艺未来的需求（例如防风、防强降雨、防强烈阳光等），对于太阳能设施而言，它们对植物、土壤和水资源的保护功能，也可以视为符合《建筑用地法》第 35 条第 1 款第 1 项所定义的“服务”功能。因此，即使太阳能设施的自用电量较低，仍可被认为是优先项目。⁸

此外，依据《建筑用地法》第 35 条第 1 款第 2 项的规定，服务于园艺生产的项目也可视为优先项目。当然，在具体案例中，还需根据第 35 条第 1 款第 1 项审查是否符合附加的从属性要求，而第 35 条第 1 款第 2 项则不涉及这一附加要求。

5 详见下文第 7.4.3 节。

6 参见德国联邦行政法院，1972 年 11 月 3 日的裁决，档案号：4 C9.70。

7 参见德国联邦行政法院，2008 年 11 月 4 日的裁决，档案号：4 B 44.08。

8 参见 Vollprecht/Kather, IR 2022, 232 (234); Attendorn, 气候保护和能源安全 2022, p. 102 f.; 另见 Frey/Ritter/Nitsch, NvWZ 2021, 1577, 第 1578 号提案表达了对宪法的关切，因为他们认为室外区域的地面光伏设施缺乏优先权。

7.2.2 项目规划的法律要求

如果某个项目在未规划的外部区域内无法获得许可，则可以通过将该区域从未规划区域“转为”规划区域来解决。此操作成功与否依赖于制定并执行针对该地区的详细发展规划。在实现过程中，建筑规划部门拥有多种灵活手段。

在发布任何形式的发展规划时，无论其复杂程度如何，都必须严格遵循《联邦建筑法》第9条所规定的要求，确保规划的合法性与有效性。因此，市政当局在行使规划职权时，必须确保其决策与《建筑法》第9条及《建筑保护条例》的各项规定保持一致，避免任何违法违规行为。根据《联邦建筑法》第11条第1、2款，特定区域可因特定目的而被指定为特殊区域，例如用于研究、开发或高效利用可再生能源（如风能、太阳能）的区域。然而，单纯将某一区域指定为太阳能特殊区域可能不足以全面反映其农业用地的本质属性。为解决这一问题，建议依据《联邦建筑法》第9条第1款第18项a子项，将该区域同时指定为农业区，实现区域功能的双重叠加与互补。值得注意的是，《联邦建筑法》第9条允许在同一区域内进行不同类型的区域划定，只要这些划定之间不存在相互排斥的关系。对于农业光伏项目而言，其独特的双重属性（农业与光伏）使得在同一区域内同时满足两种不同规划要求成为可能。为了更准确地反映农业光伏项目的特性，可以考虑引入“农业光伏专用区”这一创新命名方式。此类命名不仅应简洁明了，还应附带详细的文字说明，以明确该区域在农业与光伏发电两方面的双重功能与规划要求。

此外，根据《联邦建筑法》第12条，通过制定与项目密切相关的开发计划，规划部门可在一定程度上摆脱类型要求的严格限制，为特定项目提供更加灵活的规划路径。这一规定为农业光伏项目在规划层面的顺利推进提供了额外的回旋余地与政策支持。

7.3 遗产税、赠与税、土地税和财产转让税

如果在一块土地上建设了光伏设施，就有可能导致该土地不再被归类为农业或林业用途，而是被视为不动产。这一变化直接关系到这些资产在遗产税、赠与税、土地税以及不动产转让税等方面的税收优惠待遇。具体而言，一旦土地性质转变为不动产，原本适用于农业和林业资产的税收优惠政策将不再适用，这可能导致税负显著增加。为了明确税收优惠政策的具体适用范围，各联邦州最高税务机关于2022年7月15日发布了关于农业光伏项目归属和估价的法令。⁹根据此法令及DIN SPEC 91434标准，被认定为第一类或第二类农业光伏项目的区域，仍可享受农业和林业资产的税收优惠待遇。然而，对于不属于这两类的项目，特别是地面光伏设施，

则被视为不动产，因此无法享受上述优惠。这一规定明确指出了税收优惠政策的局限性，即并非所有地面光伏设施都能享受与农业资产同等的税收待遇。

不过，即使设施不符合DIN SPEC 91434标准的要求，也有一些规定可以规避上述不利因素。

比如，巴伐利亚州在土地税方面提供了一项特殊规定。根据《巴伐利亚土地税法》（BayGrStG）第9条第3款，如果合同中明确约定，在地面光伏设施拆除后，土地将继续用于农业和林业生产，那么即便该土地已被转让给光伏设施的运营方，也仍可按照更为优惠的财产税A类税率进行缴税。这一规定为巴伐利亚州的农业光伏项目提供了额外的税收激励，鼓励投资者在保护土地农业属性的前提下进行光伏设施建设。

7.4 《可再生能源法》（EEG 2023）

农业光伏项目作为利用太阳能资源进行电力生产的重要形式，根据《可再生能源法》（EEG 2023）第3条第1项的规定，明确被归类为“普通”可再生能源发电设施。

随着《可再生能源法》（EEG 2023）的修订，德国政府在推动可再生能源发展方面迈出了重要一步。“太阳能一揽子计划”（Solarpaket）是德国政府在既有《可再生能源法》（EEG 2023）基础上推出的专项措施，进一步推动太阳能的发展。作为“太阳能一揽子计划”的核心，德国政府于2023年8月底进一步提出了针对农业光伏系统的资助调整法案，其中特别设立了针对高架农业光伏项目的独立招标环节，¹⁰旨在通过更加精准和灵活的激励机制促进该领域的可持续发展。

7.4.1 并网和成本分摊

依据《可再生能源法》（EEG 2023）第8条第1款的明确规定，农业光伏项目的运营商享有向供电网运营商提出优先并网要求的权利。在并网过程中，如何合理分摊相关成本是一个关键问题。《可再生能源法》（EEG 2023）对此进行了明确规范，提出了以“总经济成本最低”为指导原则的并网方案确定机制。具体而言，电网连接成本主要由发电厂运营商承担，而电网扩建成本则转由电网运营商负责。¹¹

9 联邦税务公报，第一部分，2022年第1226页。第12期《建筑法》第9条。

10 参见德国联邦经济和气候保护部、德国联邦食品和农业部及德国联邦环境、自然保护、核安全和消费者保护部三个联邦部委的联合新闻稿，见https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Gesetz/20230816-gemeinsames-pressepapier-photovoltaik.pdf?__blob=publicationFile&v=10

11 参见《可再生能源法》（EEG 2023）第16条第1款；第17条。

7.4.2 电力收购

在《可再生能源法》（EEG 2023）的框架下，农业光伏（Agri-PV）设施的运营者有权要求电网运营商优先接受其并网。只有在特定情况下，如再调度 2.0 的实施等，电网运营商才能拒绝其并网请求。然而，即便在这些特殊情况下，运营者也有权为未能并网而损失的电力获得相应的经济补偿，从而保障了其合法权益不受侵害。¹²

值得注意的是，运营商在履行并网义务的同时，也拥有一定的灵活性。他们可以选择不并网，而是将所生产的电力自用或供应给第三方，以满足不同的能源需求和市场策略。¹³

7.4.3 财政支持

随着《可再生能源法》（EEG 2023）的深入实施，农业光伏项目在财政支持方面也迎来了诸多积极变化。尽管并网的财政支持体系变得更为复杂，但新法仍为农业光伏项目的发展提供了强有力的政策支持。

市场化交易、招标制度和补贴期限

为了促进可再生能源市场的健康发展，新法规定了装机容量超过 100 kWp¹⁴ 的项目运营者需参加市场化交易。¹⁵ 依据《可再生能源法》（EEG 2023）第 20 条，如果电力市场交易价格低于基准电价，则电站运营者有权从电网运营商处获得溢价补贴。¹⁶ 溢价补贴的数额为设定的基准电价与当年太阳能市场平均价格的差额。¹⁷

对于装机容量不超过 100 kWp 的农业光伏项目，电网运营商有义务收购电力。上网电价根据设定的基准电价计算，

并对波动较大的可再生能源（如农业光伏）扣减 0.4 ct/kWh。当然，农业光伏项目运营者也有权选择参与市场化交易，以获取可能更高的电力销售价格。¹⁸ 根据《可再生能源法》（EEG 2023）的相关规定，装机容量超过 1 MWp¹⁹ 的农业光伏项目运营者必须参与第一类²⁰ 或第二类²¹ 太阳能设施的招标。第一类通常指的是地面安装的太阳能光伏设施。这些设施大多安装在农业用地或其他空旷的地面上。第二类一般指的是建筑或设施上安装的太阳能光伏系统，如屋顶太阳能系统。

当农业光伏项目由公民能源合作社（Bürgerenergiegesellschaft）运营时，该项目可免于参与常规的招标程序，但前提是该合作社必须满足《可再生能源法》（EEG 2023）第 3 条第 15 款所规定的条件。值得注意的是，虽然免除了招标程序，但为保持公平竞争与资源有效配置，针对此类项目的参与门槛被提高至 6000 kWp。²² 因此，成立公民能源合作社不仅有助于提高项目的社会接受度，还可以享受更高的招标豁免门槛。

对于地面光伏设施，还必须遵守《可再生能源法》（EEG 2023）第 38a 条第 1 款第 5 项中规定的“20 MWp 限制”：如果设施的容量超过此限额，超出部分将无法获得财政补贴。但在 2023 年特定招标期内，该限额例外地被提高至 100 MWp。²³ 对于第二类设施，每次投标的容量上限为 20 MWp。²⁴

财政补贴从设施投入运营之日起支付，为期 20 年。²⁵ 对于财政补贴金额由法律规定的项目，补贴支付的终止日期延至第 20 年的 12 月 31 日。此外，并网和电力收购的权利被视为“永久权利”，不受时间限制，进一步保障了项目运营者的合法权益。

12 参见 Lamy/Lehnert, EnWZ 2021, 208ff.

13 由于这些情况不使用电网，因此不会产生电网费用。并网收费和征税也是如此（例如 CHP 税、StromNEV 税第 19 条第 2 款、离岸电网税、特许权费）。因此，与通过电网供电的供应商相比，设施运营者可以为供电方提供更优惠的电价。EEG 税将于 2023 年 1 月 1 日取消，因此，这一税收今后将不再起作用。但是，必须考虑到电费税，《电力税法》第 9 条第 1 款第 1 和第 3 项规定的免税等措施可提供优化机会。

14 在确定此处和下文中的设施规模时，一般必须遵守《可再生能源法》（EEG 2023）第 24 条第 1 款和某些情况下第二款中的“括号规定”。

15 这可以从《可再生能源法》（EEG 2023）第 21 条第 2 款第 2 项中得出。据此，设施运营者可将电力出售给电网运营商。但是，他们只能获得较低的默认电价。这种低上网电价旨在激励设施运营者尽快转回直接营销。

16 招标价格单位为每千瓦时美分。

17 参见《可再生能源法》（EEG 2023）附件一，第 1,2 项。

18 参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 21 条第 1 项及第 53 条第 1 款第 2 项。

19 参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 22 条第 3 款第 2 句 a 项。

20 安装在既非建筑物也非隔音屏障的建筑物上或建筑物内的地面光伏设施和太阳能设施；参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 3 条第 4a 项。

21 安装在建筑物或隔音屏障上、建筑物内或隔音屏障上的太阳能设施；参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 3 条第 4b 项。

22 参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 22 条第 3 款第 2 句 b 项。

23 参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 100 条第 13 款第 1 句。

24 参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 38c 条第 2 款。

25 参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 25 条第 1 款；另请注意第 51a 条。

财政补贴的条件

除了《可再生能源法》（EEG 2023）规定的条件外，申请财政补贴还需满足针对太阳能项目的特殊要求。以下简要概述了这些要求，但并非详尽列出。

建筑物上安装的光伏设施

根据《可再生能源法》（EEG 2023）第 48 条第 1 款第 1 项的规定，²⁶ 若设施安装于建筑物或其他建筑结构上或内部，且其主要功能非直接用于太阳能发电，而是同时服务于其他目的（即“双重用途”），则此类设施有权申请财政补贴。该规定旨在鼓励在已有用途的区域内进行太阳能设施的“复合利用”。

具体而言，光伏系统可以安装于屋顶之上，²⁷ 如温室顶部。在此类情况下，需确保温室的主要功能，如农业生产，不受影响，且处于首要地位。若出于容纳和运行发电设施及符合《可再生能源法》资助条件的目的，对建筑结构进行了稳定性与耐久性的合理增强，即便这些增强措施对实现建筑主要功能非绝对必要，也可纳入补贴范畴，²⁸ 但需依据个案具体情况进行详细评估。对于装机容量不超过 1000 kWp 的屋顶光伏设施，若发电量全部并入电网（而非仅限于“多余电量”），则可获得更高的财政补贴。²⁹

光伏设备的安装范围可拓展至其他建筑结构上，如啤酒花种植棚架。在此类场景下，棚架的主要功能是支持植物生长，而光伏组件的附加安装则属额外利用，符合“双重用途”原则。因此，根据联邦法院（BGH）的意见，支架结构为了稳定性和耐用性进行适度优化的做法可接受，不会影响根据《可再生能源法》（EEG 2023）第 48 条第 11 款第 1 项申请补贴的资格。

这一原则同样适用于果园和葡萄园中的棚架，但针对具体案例仍需细致分析，以确保支架的主要用途为农业或园艺，而非太阳能发电。

26 就“招标设施”而言，这源于《可再生能源法》（EEG 2023）第 38c 条第 1 款和第 37 条第 1 款第 1 项。

27 参见 EEG 2004 BGH, 判决 v. 2010 年 11 月 17 日 - viii ZR 277/09。2010 年 11 月 17 日 - VIII ZR 277/09。

28 参见 EEG 2004 BGH, 判决 v. 2010 年 11 月 17 日 - viii ZR 277/09。2010 年 11 月 17 日 - VIII ZR 277/09。

29 参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 48 条第 2 款、第 2a 款。

30 就“招标设施”而言，这源于《可再生能源法》（EEG 2023）第 37 条第 2 款第 2 项 c 子项。

31 作为例外，如果符合《建筑法》第 35 条第 1 款第 8 项 b 子项的规定（见上文），则根据《可再生能源法》（EEG 2023）第 37 条第 1 款第 2 项 c 子项的规定，该规定不适用。

地面光伏设施

地面光伏设施的安装若未依附于既有建筑或其他结构物，依据《可再生能源法》（EEG 2023）第 48 条第 1 款第 3 项³⁰ 等相关条款，仍有资格争取财政补贴。此类设施需满足特定条件，首先，其所在区域应³¹ 拥有具备法律约束力的土地利用规划，且该地块不得为排干水分的沼泽地。³² 这一规定强调了对特定土地类型的保护，以防止对生态敏感地区的不利影响。对于在农业用地上部署的光伏设备，若其开发计划系 2003 年 9 月 1 日之后专为安装太阳能设施而制定或调整，则必须选址于特定区域，如距高速公路或铁路³³ 沿线 500 米范围内，或位于已改变用途的转换用地上。

最后，根据《可再生能源法》（EEG 2023）第 38a 条第 1 款第 5 项 b 子项的规定，地面光伏设施若想获得财政补贴，还需确保其所在区域未被《联邦自然保护法》列为自然保护区或国家公园。此条款旨在严格保护自然生态体系与国家级的自然保护区，确保可再生能源的发展与环境保护的和谐共存。

德国《可再生能源法》（EEG 2023）中针对不同类型的农业光伏系统新增了三个资助条款，分别为第 37 条第 1 款第 3 项 a 至 c 项以及第 48 条第 1 款第 5 项 a 至 c 项。³⁴ 这些条款规定了对特定类型系统的资助条件，具体包括：

1. 耕地农业光伏（Acker-Agri-PV）：该资助条款（第 a 项）适用于在耕地上安装的光伏系统，要求同时在相同区域³⁵ 内进行作物种植。³⁶ 即耕地不仅用于发电，还需保持农业用途。
2. 多年生作物农业光伏（Kulturen-Agri-PV）：该条款（第 b 项）适用于在同时进行多年生或永久性作物种植的区

32 根据《可再生能源法》（EEG 2023）第 3 条第 34a 项的规定，泥炭地是指符合《GAP 条件条例》第 11 条第 2 款要求的土地，并可根据《GAP 条件条例》第 11 条第 3 款作为绘制区域图的基础。这方面的问题是，可能无法根据所列标准对某一区域进行法律上确定的分类。因此，如果德国联邦网络机构有义务以法律确定性的方式将这些区域指定为泥炭地，那将是非常理想的。

33 在此之前，该地带的长度限制为 200 米，并且必须在该地带内保持 15 米宽的走廊，参见 2021 年《可再生能源法》第 37 条第 2 款第 2 项和 2021 年《可再生能源法》第 48 条第 1 款第 3 项。

34 就“招标设施”而言，这源于《可再生能源法》（EEG 2023）第 37 条第 1 款第 3 项 a 至 c 子项。

35 在此需要指出的是，投标人在提交投标书时必须提交一份自我声明，说明已核实该土地不属于与自然保护相关的耕地。（参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 37 条第 2 款第 3 项）。目前还不清楚在财政支持的要求方面，可以从中引申出哪些要求。

36 对于依法确定其招标价格的设施，该区域不得被依法指定为《联邦自然保护法》第 23 条所指的自然保护区或《联邦自然保护法》第 24 条所指的国家公园（参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 48 条第 1 款第 5 项 a 子项）。

域³⁷（如果树、葡萄园等）上安装的光伏系统。³⁸它支持在多年生作物栽培区内发展光伏系统，以实现农光互补。

3. 草地农业光伏（Grünland-Agri-PV）：第 c 项规定支持在草地上安装的光伏系统，但要求该区域应保持为永久性草地用途，且不位于 Natura 2000 自然保护区或欧盟保护类型（如《栖息地指令》附录 I 所列生境类型）中。³⁹该草地也不能为泥炭地。⁴⁰

此外，这些系统必须以最低 2.1 米的支撑高度架设，以确保农业机械作业空间，同时也可凭此获得技术奖励。具体而言，2023 年批准的项目，该技术奖励可达 1.2ct/kWh，随后在 2026 年至 2028 年间逐渐降至 0.5ct/kWh。⁴¹然而，值得注意的是，技术奖金的申请需以设施运营商成功参与第一部分太阳能设施招标为前提。已获法律规定财政支持额度的设施不可再申请此奖金。这一规定因缺乏明确客观理由而引发争议。因此，建议在《可再生能源法》第 48 条第 4 款中新增条款，明确按照设备投入使用的日期作为奖金发放的依据。对于 2023 年批准的项目，该技术奖励为 1.2ct/kwh，但会逐步减少，至 2026 至 2028 年批准的项目时将降为 0.5ct/kwh。这些资助条款为不同农业用途的光伏系统提供了定向支持，鼓励多种类型的农光互补项目发展。

另一特殊光伏设施为“沼泽光伏”，依据《可再生能源法》第 37 条第 31 款第 3 项 e 子项，⁴²其获得财政补贴的条件是：项目必须建于已排水并用于农业的沼泽地上，且设施建造后该地区将永久性恢复湿润。此外，此类项目也无需位于发展

规划范围内。对于此类设施，《可再生能源法》第 38b 条第 2 项第 3 句设定了 0.5ct/kWh 的“沼泽补贴（Moor-Bonus）”。

德国联邦网络管理局依据《可再生能源法》（EEG 2023）第 85c 条的规定，负责详细界定这些特殊太阳能设施的规范。对于耕地农业光伏（Acker-Agri-PV）和多年生作物农业光伏（Kulturen-Agri-PV），德国联邦网络机构已于 2021 年 10 月 1 日发布了相关规定。⁴³关于草地农业光伏（Grünland-Agri-PV）和沼泽光伏（Moor-PV），现已发布了相应的规定。⁴⁴特别值得注意的是，在沼泽光伏项目中，允许进行额外的湿地农业（Paludikultur）作为合法的附加用途，这对于充分利用潜在资源是合理的。然而，对于高架的沼泽光伏设施，除了给予沼泽奖金（Moor-Bonus）外，还应额外提供技术奖金（Technologie-Bonus）。《可再生能源法》（EEG 2023）关于财政支持的扩大范围，仅针对在制定或修改发展计划时已被用作耕地或草地的地块，且这些地块未被归入其他土地类别。⁴⁵

在补贴政策上，屋顶设施、建筑物上的设施、传统地面光伏设施及特殊太阳能设施之间不存在排他性或优先/从属关系。这种无差别的待遇体现了补贴政策的公平性，也符合德国政府促进可再生能源发展的初衷。因此，当同一设施满足多个资助类别的条件时，投标人或设施运营商有权自行选择申请何种资助类别⁴⁶。

创新型招标⁴⁷

根据《创新招标条例》（InnAusV）第 2 条的规定，只有符合特定设施组合定义的项目才有资格参与竞标。这意味着，农业光伏项目必须结合储能设备或其他绿色电力设施，并通过共同的电网连接点向电网供电。⁴⁸投标人将根据《可再生能源法》（EEG 2023）第 19 条第 1 项的规定，从电网运

37 在此需要指出的是，投标人在提交投标书时必须提交一份自我声明，说明已核实该土地不属于与自然保护相关的耕地。（参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 37 条第 2 款第 3 项）。目前还不清楚从这一规定中可以引申出哪些有关财政支持的要求。

38 对于依法确定其招标价格的设施，该区域必须未被依法指定为《联邦自然保护法》第 23 条所指的自然保护区或《联邦自然保护法》第 24 条所指的国家公园（参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 48 条第 1 款第 5 项 b 子项）。

39 对于依法确定其招标价格的设施，该区域也必须未被依法指定为《联邦自然保护法》第 23 条所指的自然保护区或《联邦自然保护法》第 24 条所指的国家公园（参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 48 条第 1 款第 5 项 c 子项）。

40 这与《可再生能源法》（EEG 2023）第 48 条第 1 款第 3 项或第 37 条第 1 款第 2 项 c 对“正常”地面光伏设施的财政支持要求有很大不同。

41 参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 38b 条第 1 款第 2 句。

42 其招标价格由法律确定的设施，这源于《可再生能源法》（EEG 2023）第 48 条第 1 款第 5 项 e 子项。

43 参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 85c 条第 2 款；2021 年 10 月 1 日的决定 - 编号：8175-07-00-21/1，可查阅：https://www.bundesnetzagentur.de/Shared-Docs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Innovations/GezeichneteFestlegungOktob2021.pdf?sessionid=2CCC48CFBAEEAB49D559C0D002E2107D?blob=publicationFile&v=3。

44 可查阅：

https://www.bundesnetzagentur.de/Shared-Docs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Solar1/BesondereSolaranlagen/Festlegung.pdf?_blob=publicationFile&v=2。

45 参见《可再生能源法》（EEG 2023）第 37 条第 1 款第 2 项 h. 和 i 子项。

46 另见 2019 年 1 月 11 日仲裁裁决中关于改建区域（EEG 2017 第 37 条第 1 款第 3 项 b 子项）和其他建筑物（EEG 2017 第 37 条第 1 款第 2 项）的 Clearingstelle EEG|KWKG - Ref. 2018/39，见 https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/sites/default/files/Schieds-spruch_2018_39.pdf。

47 这里不讨论根据《可再生能源法》（EEG 2023）第 39o 条对基于氢的电力储存创新概念的招标，或根据《可再生能源法》（EEG 2023）第 39p 条对利用绿色氢发电的工厂的招标。农业光伏项目也可以在这方面发挥作用。然而，相应的法令尚未颁布，这意味着目前还无法做出具体说明。

48 参见《创新招标条例》第 2 条。

营商处获得市场溢价。⁴⁹ 值得注意的是，随着《可再生能源法》（EEG 2023）的实施，针对特殊太阳能设施的规定已被纳入第一部分的招标流程中，自 2023 年 1 月 1 日起生效。因此，对于这些设施而言，原有的特殊规定和固定市场溢价机制已不再适用。⁵⁰

关于高架农业光伏项目是否可以作为设施组合的一部分并申请技术奖金，以及沼泽光伏发电项目是否同样适用“沼泽光伏补贴”，这些问题尚需进一步讨论和明确。理论上，如果这些项目符合《创新招标条例》规定的设施组合要求，并满足相应的技术和经济条件，那么它们应当有资格申请相应的奖金或补贴。此外，在《创新招标条例》第 3 条第 3 款（旧版本）中提及的 2021 年《可再生能源法》第 38b 条的执行问题，也需根据当前法规的实际情况进行调整。由于 2021 年《可再生能源法》第 38b 条是基于固定上网电价制定的，而新的政策框架已经转变为市场溢价模式，因此执行指令需要相应地更新，以确保与现行法规的一致性。⁵¹

在 2023 年 1 月 1 日起的招标中，《可再生能源法》（EEG 2023）第 38b 条第 1 款也适用于高架农业光伏设施发电或沼泽光伏设施发电。《创新招标条例》第 8 条第 2 款规定，从储能设施中获取的电力与直接并网的电力享有相同的财政补贴。

7.4.4 公众对地面光伏设施的参与

为了提升公众对于农业光伏项目的接受度，《可再生能源法》（EEG 2023）第 6 条规定，光伏设施运营商须向受影响的社区提供最高 0.2ct/kwh 的补助。对于获得财政补贴的设施，补助由电网运营商承担。对于其他设施（即所谓的 PPA 设施），设施运营商必须自行承担这笔费用。

49 《创新招标条例》第 8 条。

50 原始条例见 Vollprecht/Kather, IR 2021, 266 (268)。

51 关于风力发电厂的类似规定，参见 Baur/Lehnert/Vollprecht, EnWZ 2021, 341 ff. 联邦新能源经济协会 (Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V.) 制定了社区参与合同范本，可从 <https://sonne-sammeln.de/mustervertrag/> 下载。

8 推进农业光伏的发展

全球正面临气候危机、水资源短缺、能源和粮食需求持续增长等多重挑战。未来几年将成为人类是否有能力应对这些挑战、以及如何应对的关键时期。如果我们希望在维持发达国家现有生活水平的基础上，改善全球国家的生活质量，就必须找到一条兼顾两者的路径，实现看似矛盾的目标。一方面，人类社会需要延续现有的繁荣，推动可持续发展，创造宜居的未来；另一方面，必须减少对自然资源的消耗，降低对气候的负面影响。农业光伏技术可以在实现这一目标的过程中发挥重要作用。

本指南介绍了农业光伏的技术现状、潜力及多样化应用领域。农业光伏不仅能够提高土地利用效率，还能减少农业用水，帮助农业企业获得稳定的额外收入来源，提高企业在歉收年中的韧性。农业光伏的成功关键在于让当地居民早期参与项目规划。当前，农业光伏的发电成本约为每度电 6 至 10 欧分，与其他可再生能源相比已具备竞争力。然而，由于缺乏完善的法律框架，德国的农业光伏项目在经济效益上仍面临限制。为支持农业光伏的推广，监管框架可以从以下方面进行调整：

根据《联邦建筑法》第 35 条第 1 款的规定，赋予农业光伏项目建设优先权，简化其审批程序；

根据《可再生能源法》对农业光伏设施的电力实行上网电价补贴，费率位于地面光伏设施与屋顶光伏系统之间，例如设立农业光伏专门的招标项目。实施“1000 个地块计划”，推动农业光伏的进一步发展，并为其提供资助。

农业光伏在园艺设施中的应用具有显著的市场化前景。这类设施通常毗邻农场，能更好地与作物协同发展；设施架高所需的成本较低，并且易于与永久性作物的耕作方式结合。此外，这一应用领域的项目相对更容易获得审批。园艺领域的农业光伏更容易被认定为《联邦建筑法》第 35 条第 1 款第 2 项规定的优先建设项目。

园艺应用场景的另一大优势在于：农业光伏的应用提高了农业附加值。许多园艺的应用场景十分高产：园艺仅占农业用地的 1.3%，但其对农业附加值的贡献却超过了 10%^[35]。因此，对园艺农业光伏的资助能够激励农业企业更为积极地投身该部门，即便农业光伏的占地面积非常小，远低于 1%，但却能对德国整个农业生产体系形成杠杆效应。水果和浆果种植尤其如此。

在关于农业光伏的讨论中，人们经常抱有这样的观点：当务之急是充分挖掘德国屋顶光伏的潜力。毫无疑问，屋顶光伏在未来仍将是光伏扩展的重要组成部分，不仅因为其具备分布式发电、不占用额外土地的优势。同时，支持将农业光伏作为一种可再生能源技术补充的理由也十分充分：一方面，农业光伏（尤其是大型系统）得益于规模效应，平均建设成本低于屋顶光伏，可确保绿电价格较为亲民。另一方面，理想情况下，光伏组件能促进植物生长，而屋顶光伏“仅仅”拥有不占用额外土地的优势。

尽管在迄今为止的研究表明，大部分农业光伏系统下的农业收成有所减产。但黑格尔巴赫研究设施 2018 年的收成情况表明，农业光伏虽然仍处于早期技术发展阶段，却为农业应对多重挑战提供了潜在解决方案。挑战之一是德国日益严重的干旱气候。气候危机的加剧使得气温升高、极端天气的发生愈发频繁。就欧洲中部地区而言，日照量也有所增加。因此，在未来，光伏组件对植物起到的保护功能将具有更为重要的意义。

农业光伏的未来研究领域涉及储能技术、有机薄膜太阳能电池和太阳能水处理及水分配。同时，电动农业机械和智能化自动耕田系统也属于颇有发展前景的研究领域。“智能农机集群作业”是未来发展的一种愿景。在这种情境下，太阳能电气化的小型农业机械在农业光伏系统下自动工作，同一块土地上既耕作又能直接发电。这一模式能显著降低对设施净空高度的要求。农业光伏设施的支撑结构和电力生产为整合智能农业技术提供了有利条件。弗劳恩霍夫太阳能系统研究所已将一套自动化耕田系统集成到农业光伏设施的支架中，并在一个 1.2×3 米的区域内进行测试。

长远来看，光伏将成为与风能比肩的重要能源供应支柱。面对气候危机与水资源短缺，农业部门亟需引入新方案，增强经济与生态韧性。通过双重土地利用，农业光伏不仅提高了发电量，也确保肥沃的土地资源仍然用于粮食生产，显著提升了土地利用效率。

同时，农业光伏还为土壤提供了保护，减轻极端高温、暴雨及干旱等天气事件对土壤的侵害。更重要的是，它能以更加环保的方式满足农业企业的能源需求。

德国首批农业光伏设施已经证明了其技术可行性。然而，德国迄今采取的措施远不足以充分挖掘该技术的潜力。如果沿用当前的逻辑，即发电成本最低者中标，这种传统的招标模式没有考虑到多样化的应用领域，也不利于挖掘未知的协同效应。

只有通过跨部门的沟通与合作，才能充分认识农业光伏所面临的特殊挑战与资助需求。因此，应当在农业部门与能源部门之间建立有效的对话机制。这一机制不仅有助于在制定政策时考虑农业需求和光伏技术的经济可行性，更能为农业光伏提供系统性的支持，全面把握农业光伏在农业和能源转型中的巨大潜力。

9 文献和资料来源

9.1 资料来源

- [1] D. Ketzer: Land Use Conflicts between Agriculture and Energy Production. Systems Approaches to Allocate Potentials for Bioenergy and Agrophotovoltaics. Dissertation, 2020
- [2] P. Sterchele, J. Brandes, J. Heilig, D. Wrede, C. Kost, T. Schlegl, A. Bett, and H.-M. Henning: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen, Freiburg 2020. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>, accessed on: June 8, 2020
- [3] A. Goetzberger and A. Zastrow: Kartoffeln unter dem Kollektor. *Sonnenenergie* 3/81 (1981), p. 19 – 22
- [4] Institute for Technology Assessment and Systems Analysis: APV-RESOLA — Agrivoltaics innovation group: contribution to resource-efficient land use. Project description, year not specified https://www.itas.kit.edu/projekte_ roes15_apvres.php
- [5] S. Schindele, M. Trommsdorff, A. Schlaak, T. Oberfell, G. Bopp, C. Reise, C. Braun, A. Weselek, A. Bauerle, P. Högy, A. Goetzberger, and E. Weber: Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy* 265 (2020), p. 114737
- [6] Stellungnahme zur BMWK-Konsultation «Eckpunkte für ein Ausschreibungsdesign für Photovoltaik-Freiflächenanlagen». Agrophotovoltaik (APV) als ressourceneffiziente Landnutzung, D. H.-J. Luhmann, P. D. M. Fishedick, and S. Schindele, 2014
- [7] Y. Elamri, B. Cheviron, J.-M. Lopez, C. Dejean, and G. Belaud: Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. *Agricultural Water Management* 208 (2018), p. 440 – 453
- [8] T. Kelm, J. Metzger, H. Jachmann, D. Günnewig, P. Michael, S. Schicketanz, K. Pascal, T. Miron, and N. Venus: Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz. Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie. Final report, 2019. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/ bmwi_de/zsv-boschundpartner-vorbereitung-begleitungegg.pdf?_ blob=publicationFile&v=7
- [9] Bundesverband Solarwirtschaft e. V.: Entwicklung des deutschen PV-Marktes. Auswertung und grafische Darstellung der Meldedaten der Bundesnetzagentur. As of: Mid-February 2020, 2020
- [10] DWD — German Meteorological Service: Zeitreihen und Trends. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html?nn=344886#buehneTop>, accessed on: December 21, 2021
- [11] M. Ionita, V. Nagavciuc, R. Kumar, and O. Rakovec: On the curious case of the recent decade, mid-spring precipitation deficit in central Europe. *npj Climate and Atmospheric Science* 3 (2020) 1
- [12] A. Weselek, A. Ehmann, S. Zikeli, I. Lewandowski, S. Schindele, and P. Högy: Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 39 (2019) 4, p. 35
- [13] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.: Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. As of: March 2019, 2019 Stand: März 2019, 2019
- [14] Fraunhofer Center for International Management and Knowledge Economy IMW: Nachhaltige Kombination von bifacialen Solarmodulen, Windenergie und Biomasse bei gleichzeitiger landwirtschaftlicher Flächennutzung und Steigerung der Artenvielfalt, year not specified (final report) https://www.openagrar.de/servlets/MCRFileNodeServlet/openagrar_derivate_00043193/BMWi_03EI5209A-D_Schlussbericht-TIB-20211129.pdf
- [15] Next2Sun GmbH: References. <https://www.next2sun.de/referenzen/>
- [16] Feasibility and Economic Viability of Horticulture Photovoltaics in Paras, Maharashtra, India, M. Trommsdorff, S. Schindele, M. Vorast, N. Durga, S. M. Patwardhan, K. Baltins, A. Söthe-Garnier, and G. Grifi, 2019
- [17] K. Schneider: Agrophotovoltaik: hohe Ernteerträge im Hitzesommer. Freiburg 2019
- [18] K. Schneider: Agrophotovoltaik goes global: von Chile bis Vietnam. Freiburg 2018
- [19] G. P. Brasseur, D. Jacob, and S. Schuck-Zöller: Klimawandel in Deutschland. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2017

- [20] J. Ballester, X. Rodó, and F. Giorgi: Future changes in Central Europe heat waves expected to mostly follow summer mean warming. *Climate Dynamics* 35 (2010) 7 – 8, p. 1191 – 1205
- [21] G. A. Barron-Gafford, M. A. Pavao-Zuckerman, R. L. Minor, L. F. Sutter, I. Barnett-Moreno, D. T. Blackett, M. Thompson, K. Dimond, A. K. Gerlak, G. P. Nabhan, and J. E. Macknick: Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability* 2 (2019) 9, p. 848 – 855
- [22] H. Marrou, J. Wery, L. Dufour, and C. Dupraz: Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy* 44 (2013), p. 54 – 66
- [23] S. K. Abeyasinghe, D. H. Greer, and S. Y. Rogiers: The effect of light intensity and temperature on berry growth and sugar accumulation in *Vitis vinifera* “Shiraz” under vineyard conditions. *VITIS - Journal of Grapevine Research* 58/1 (2019), p. 7 – 16
- [24] M. Büchele: Lucas’ Anleitung zum Obstbau. Libreka GmbH; Verlag Eugen Ulmer 2018
- [25] The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025, International Renewable Energy Agency, 2016
- [26] Solaranlage Ratgeber: Anschaffungskosten für Photovoltaik-Anlagen, year not specified <https://www.solaranlage-ratgeber.de/photovoltaik/photovoltaikwirtschaftlichkeit/photovoltaikanschaffungskosten>, accessed on: August 7, 2020
- [27] E.ON Energie Deutschland GmbH: Solaranlage Kosten: Was kostet Photovoltaik 2020?, year not specified <https://www.eon.de/de/pk/solar/photovoltaik-kosten.html>, accessed on: August 7, 2020
- [28] K. Grave, M. Hazart, S. Boeve, F. von Blücher, C. Bourgault, N. Bader, B. Breitschopf, N. Friedrichsen, M. Arens, A. Aydemir, M. Pudlik, V. Duscha, and J. Ordonez: Stromkosten der energieintensiven Industrie. Ein internationaler Vergleich. Zusammenfassung der Ergebnisse, 2015
- [29] A. Tietz: Der landwirtschaftliche Bodenmarkt —Entwicklung, Ursachen, Problemfelder. *Wertermittlungsforum* 36(2) (2018), p. 54 – 58
- [30] B. Valle, T. Simonneau, F. Sourd, P. Pechier, P. Hamard, T. Frisson, M. Ryckewaert, and A. Christophe: Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. *Applied Energy* 206 (2017), p. 1495 – 1507
- [31] Y. Elamri, B. Cheviron, A. Mange, C. Dejean, F. Liron, and G. Belaud: Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots. *Hydrology and Earth System Sciences* 22 (2018) 2, p. 1285 – 1298
- [32] C. Rösch: Agrophotovoltaik — die Energiewende in der Landwirtschaft. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 25 (2016) 4, p. 242 – 246
- [33] Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energiewende 2019. Kernaussagen und Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse, I. Wolf, Potsdam 2020
- [34] Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energieund Verkehrswende 2021. Kernaussagen und Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse, I. Wolf, A.-K. F. Fischer, and J.-H. Huttarsch, Potsdam 2021 Huttarsch, J.-H., Potsdam 2021
- [35] C. Rösch, S. Götz, J. Hildebrand, S. Venghaus, and K. Witte: Transdisziplinäre Ansätze zur Erforschung gesellschaftlicher Akzeptanz. *Energy Research for Future — Forschung für die Herausforderungen der Energiewende* (2019)
- [36] D. Ketzer, N. Weinberger, C. Rösch, and S. B. Seitz: Land use conflicts between biomass and power production — Citizens’ participation in the technology development of agrophotovoltaics. *Journal of Responsible Innovation* (2020) 7 (2), p. 193 – 216
- [37] D. Ketzer, P. Schlyter, N. Weinberger, and C. Rösch: Driving and restraining forces for the implementation of the Agrophotovoltaics system technology A system dynamics analysis. *Journal of environmental management* 270 (2020), p. 110864
- [38] BMEL German Federal Ministry for Food and Agriculture: Der Gartenbau in Deutschland Auswertung des Gartenbaumoduls der Agrarstrukturhebung 2016. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Gartenbauerhebung.pdf?__blob=publicationFile&v=7

9.2 图片目录

图 1	康斯坦茨博登湖畔的农业光伏研究设施1 © 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所	图 18	太阳能电池双面组件阵列16 © 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所
图 2	农业光伏系统的插图2 © 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所	图 19	智利弗劳恩霍夫研究所建在库拉卡维和兰帕的试点设施致力于研究哪些作物能从较低的日照中获益 © 智利弗劳恩霍夫研究所20
图 3	APV-RESOLA 的项目合作伙伴2	图 20	法国蒙彼利埃大学的农业光伏研究设施对不同的生菜品种进行了研究21 © Christian Dupraz
图 4	2010 年以来的农业光伏发展3 © 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所	图 21	黑格尔巴赫研究的作物（苜蓿草、土豆、小麦、苜蓿草）22 © 霍恩海姆大学
图 5	2004 年以来德国地面光伏设施的用地情况，既有设施总量和每年新增量4 © 德国联邦经济和能源部（BMWi） [8]	图 22	2017 年的试验田种植计划图，带测量站位置。图中用小方框标注了提取样本的区域，用圆圈标识了微气候监测站的位置23 © BayWa r.e., 编辑: Axel Weselek/ 霍恩海姆大学
图 6	光伏集成应用5 © 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所	图 23	黑格尔巴赫 2017 年（蓝色）和 2018 年（红色）农业光伏设施下方作物与参考地块相比的产量差异（不含因光伏设施支架造成的面积损失）24 数据: 霍恩海姆大学
图 7	地面光伏设施5 © 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所	图 24	黑格尔巴赫农业光伏设施农业光伏系统的防撞保护，防止对农业机械造成破坏24 © Hilber Solar
图 8	1991 年以来德国的降水和总辐射量的变化情况 数据: 德国联邦气象局, 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所绘图6	图 25	农业光伏苹果园的图示25 © 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所
图 9	农业光伏系统的分类7 © 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所	图 26	法国带有跟踪型光伏组件光伏组件的农业光伏设施。 © Sun'Agri26
图 10	DIN SPEC 91434 的类别和应用形式图示9 图 A: 第一类农业光伏的图示; 图 B: 第二类农业光伏的图示, 变体 1; 图 C: 第二类农业光伏的图示, 变体 1 和 2。	图 27	荷兰 BayWa r.e. 公司的 300kWp 试验设施, 可以为树莓提供恶劣天气下的保护 © BayWa r.e.26
图 11	德国的土地使用情况。10 © 可再生原材料专业机构 (2021) [13]	图 28	浆果种植示范项目的产量很高27 © BayWa r.e.
图 12	位于魏恩斯特潘的农业光伏设施横截面图11 © 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer	图 29	使用联合收割机的小麦产量27 © 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所
图 13	位于黑格尔巴赫的农业光伏设施草图12 © AGRISOLAR Europe GmbH	图 30	示意图: 阳地植物和耐阴植物与光照强度相关的光合作用率28 © ASPS, 根据 [24] 修改
图 14	2017 年夏天, 黑格尔巴赫农场社区农业光伏的发电量几乎可以完全覆盖公社的用电需求13 © BayWa r.e.	图 31	萨尔州埃佩尔博恩 - 迪尔明根光伏园区内的垂直双面光伏组件, 输出功率为 2MWp, 建设方是 Next2Sun 公司28 © Next2Sun GmbH
图 15	在黑格尔巴赫的试验基地里, 结合农业光伏系统后的马铃薯种植地的土地利用效率高达 186%13		
图 16	纳赫特韦有机水果农场上的农业光伏设施14 © 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所		
图 17	位于多瑙辛根阿森的垂直农业光伏项目17		

- 图 32 托马斯·施密特和弗洛里安·雷尔29
© AMA Film
- 图 33 地面光伏系统和农业光伏的投资成本 (CAPEX)
数据来源于 [5, 25]31
- 图 34 地面光伏系统和农业光伏的发电成本比较, 按照投资
成本 / 运营成本细分。数据来源于 [5, 25]31
- 图 35 地面光伏系统和农业光伏的发电成本 (LCOE) 估算
数据来源于 [4, 5, 26, 27]32
- 图 36 利益团体和合同模式34
- 图 37 高架农业光伏, 可采用马铃薯收割机耕作35
© 黑格尔巴赫农场社区
- 图 38 荷兰采用的单体太阳能电池间隙加大且具有保护功能
的光伏组件35
© BayWa r.e.
- 图 39 垂直安装的双面光伏组件, 生产厂商为 Next2Sun 公
司, 埃佩尔博恩 - 迪尔明根36
© Next2Sun GmbH
- 图 40 薄膜大棚上方的光伏组件36
© BayWa r.e.
- 图 41 TubeSolar 公司生产的管状特薄型光伏组件36
© TubeSolar AG
- 图 42 通过太阳能管实现部分遮阳, 悬挂在 TubeSolar 公司
的拉绳之间36
© sbp sonne gmbh
- 图 43 意大利采用窄幅光伏组件组成的农业光伏系统36
© REM Tec
- 图 44 带有连续组件阵列的农业光伏系统37
© Sun'Agri
- 图 45 法国一座示范设施的单轴跟踪器系统38
- 图 46 带锚板和螺纹杆的旋转锚栓, 用以固定地面上的安装
系统39
© Spinnanker
- 图 47 东西向、朝南和东南朝向的各类设施类型图示39
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所
- 图 48 光伏组件光伏组件的阴影条随太阳高度角移动40
© 霍恩海姆大学
- 图 49 带储水容器的雨水收集系统方案41
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所
- 图 50 黑格尔巴赫农业光伏设施, 装机容量为 194 kWp41
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所
- 图 51 埃佩尔博恩 - 迪尔明根光伏园区, 安装了功率 2 MWp
由 Next2Sun 生产的垂直型光伏围栏41
© Next2Sun GmbH
- 图 52 在太阳能组件下的农业光伏系统中工作42
- 图 53 为避免填土夯实而建的施工道路43
© BayWa r.e.
- 图 54 对黑格尔巴赫农业光伏设施进行维护44
- 图 55 APV-RESOLA 项目的公共宣传活动46
© 技术影响评估和系统分析研究所
- 图 56 黑格尔巴赫项目宣传活动中陈设的光伏设施模型47
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所
- 图 57 超学科多级的农业光伏研究方案47
© 技术影响评估和系统分析研究所
- 图 58 无法从事农业耕作的中间狭长地带可以用在农业光伏
系统中, 用来提高农业用地的生物多样性48
© 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所
- 图 59 建筑许可程序流程举例50

9.3 表格目录

表 01	DIN SPEC 91434 规定的类别和应用形式概述.....	8
表 02	德国当前的研究设施一览	10
表 03	对卷心菜作物的损害	10
	© 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer	
表 04	德国的实践设施一览	15
表 05	德国部分研究项目概览	17
表 06	各类农业光伏项目的商业模式构成（基于 Schindele 等人, 2019[5]）	34
表 07	农业光伏的审批步骤概述	43

9.4 缩略语

Agri-PV	农业光伏
APV-RESOLA	农业光伏资源高效的土地利用
BMBF	德国联邦教育和研究部
W	瓦特
kW	千瓦
kWh	千瓦时
Wh	瓦时
GW	吉瓦
GWh	吉瓦时
TWh	太瓦时
MW	兆瓦
MWh	兆瓦时
CAPEX	投资支出
OPEX	运营成本
LCOE	发电成本
STC	标准测试条件
EEG	《可再生能源法》
EE	可再生能源
REAP	农村能源促进计划
PV-FFA	地面光伏设施
PPA	购电协议
CIS	铜铟硒
CdTE	碲化镉
a-Si	非晶硅
μ-Si	微晶硅
OPV	有机光伏
CPV	聚光光伏

9.5 相关文献链接

弗劳恩霍夫太阳能系统研究所的农业光伏网站：
<https://www.agri-pv.org>

关于黑格尔巴赫农业光伏研究设施的短片：
<https://www.youtube.com/watch?v=BIXPf-e1a0U>

巴登 – 符腾堡州环境、气候和能源经济部关于地面光伏设施的行动指南：

<https://um.baden-wuerttemberg.de/de/service/publikation/did/handlungsleitfaden-freiflaechensolaranlagen/>

弗劳恩霍夫太阳能系统研究所的农业光伏研发工作介绍：

<https://www.ise.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/photovol-taik/photovoltaische-module-und-kraftwerke/integrierte-pv/agrar-photovoltaik.html>

水果种植光伏项目网站：

<https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/apv-obstbau.html>

“联邦州创造能源”咨询网络的农业光伏行业目录：

<https://www.landschaftenergie.bayern/beratung/branchenverzeichnis/>

DIN SPEC 91434:2021-05, 《农业光伏设施——以农用为主的要求》：

<https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-91434/337886742>

施特劳宾技术与促进中心的农业光伏现状报告：

<https://www.tfz.bayern.de/service/presse/268709/index.php>

网站



微信

