

Agri-Photovoltaik in Marokko

mit einer Fallstudie zum Apfelanbau
in der Region Midelt

Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science (M.Sc.)

**in der Studienfachrichtung
Erneuerbare Energien Management**

Vorgelegt bei: Erstgutachterin: Kerstin Wydra, Prof. Dr. sc. agr. habil.

Zweitgutachter: Frederik Langner, Dr.

Eingereicht Von: Yacine Aseri

Geburtsort: Larache, Marokko

Adresse: Rathenaustr. 39, 99085 Erfurt

Matrikel-Nr.: 10314535

Eingereicht am: 28. Mai 2025

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Zusammenfassung	IV
Abstract.....	VI
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis.....	X
Abkürzungsverzeichnis.....	XI
1. Einleitung	1
1.1 Marokko	1
2. Erneuerbare Energien in Marokko.....	4
2.1 Politik	7
2.2 Energieabhängigkeit in Marokko	8
2.3 Technik und Potenzial	10
2.3.1 Solarenergie.....	11
2.3.2 Windenergie	14
2.3.3 Wasserkraft.....	16
2.3.4 Biomasse	17
2.3.5 Geothermie	18
2.4 Plan 2030 - 2050	19
3. Landwirtschaft in Marokko	20
3.1 Einleitung	20
3.2 Geografische und klimatische Bedingungen.....	24
3.3 Bedeutung der Landwirtschaft für Marokko	26
3.4 Wasserressourcen	29
3.5 Bewässerung	34
3.6 Wichtige Anbauprodukte	36
3.7 Regierungspolitik und Reformen	41
3.8 Herausforderungen: Extremwetter und Gefahren	42
4. Agriphotovoltaik Konzept	46
4.1 Definition, Entwicklung, Potenziale und Verbreitung.....	46
4.2 Stand der Technik APV-Freiland	56

4.3	Aufständering	58
4.3.1	Hoch aufgeständerte APV-Anlagen / Kategorie I	58
4.3.2	Bodennahe Anlage / Kategorie II	60
4.3.3	Tracking-Systeme (Nachführsysteme)	62
4.3.4	Seilaufhängungssysteme	64
4.3.5	Holzaufständering	65
4.3.6	Faltdachsysteme	66
4.3.7	Innovative Ansätze	67
4.4	Module	68
4.4.1	Semitransparente Module	68
4.4.2	Bifaziale Module	69
4.4.3	Dünnschichtmodule	69
4.4.4	Leichte Module	70
4.4.5	Organische Module	71
4.4.6	Röhrenförmige Module	71
4.4.7	Farbige Module	72
4.4.8	Anti-Reflexbeschichtung der Module	72
4.4.9	Konzentrierende Photovoltaik (CPV)	73
4.5	Fundamentierung	74
4.6	Potenziale für Marokko	75
5.	Fallstudie	77
5.1	Verortung des Projektes	77
5.2	Begründung der Standortwahl: Midelt, Marokko	78
5.3	Methodik	79
5.4	Technische Analyse	79
5.4.1	Überlegungen zu Standort und Pflanzenanordnung	80
5.4.2	APV-Systemkonfiguration	80
5.4.3	Photovoltaik-Komponenten	82
5.4.4	Balance of System (BOS)	83
5.4.5	Technische Aspekte und Synergien	83
5.4.6	Integration einer Super Capacitor Batteriebank	84
5.4.7	Integration einer Regenwassernutzungsanlage	86

5.5	Wirtschaftliche Analyse	90
5.5.1	Installationskosten (CAPEX)	91
5.5.2	Betriebs- und Wartungskosten (OPEX)	92
5.5.3	Stromerzeugung und Einnahmen	93
5.5.4	Landwirtschaftlicher Ertrag – Apfelproduktion.....	94
5.5.5	Stromgestehungskosten (LCOE)	96
5.5.6	Amortisationszeit (Payback Periode)	97
5.5.7	Kapitalrendite ROI (Return on Investment)	97
5.5.8	Fazit	98
6.	Fazit, Diskussion und Ausblick	100
	Literaturverzeichnis.....	XIII
	Danksagung	XLIX
	Eidesstattliche Erklärung	L

Zusammenfassung

Marokko steht aufgrund des Klimawandels und seiner hohen Abhängigkeit von fossilen Energieimporten vor wachsenden ökologischen und ökonomischen Herausforderungen. Klimatische Veränderungen wie steigende Temperaturen, unregelmäßige Niederschläge und häufige Dürren beeinträchtigen die landwirtschaftliche Produktivität, gefährden die Ernährungssicherheit und bedrohen die Lebensgrundlagen der ländlichen Bevölkerung. Gleichzeitig deckt das Land über 90 Prozent seines Primärenergiebedarfs aus fossilen Energieträgern, was es anfällig für internationale Preisschwankungen macht und den Übergang zu einer nachhaltigen Entwicklung erschwert.

Vor diesem Hintergrund stellt die Agriphotovoltaik (APV) einen vielversprechenden Lösungsansatz dar. Diese Technologie ermöglicht die Doppelnutzung landwirtschaftlicher Flächen für die gleichzeitige Produktion von Nahrungsmitteln und Solarstrom. Die kombinierte Landnutzung kann dazu beitragen, den Wasserverbrauch zu reduzieren, das Mikroklima zu verbessern und die Energieautarkie ländlicher Regionen zu stärken.

Die vorliegende Studie untersucht die technische und wirtschaftliche Machbarkeit eines APV-Systems anhand einer Fallstudie in Midelt, einer wichtigen Apfelanbauregion im marokkanischen Hochland. Im Konzept werden auf einer Fläche von einem Hektar semitransparente, bifaziale Photovoltaikmodule (PV-Module) installiert. Die Analyse umfasst das technische Systemdesign sowie die Integration ergänzender Technologien, insbesondere von Regenwassernutzungssystemen, die das auf den PV-Modulen anfallende Niederschlagswasser sammeln, speichern und für die landwirtschaftliche Nutzung wiederverwenden. Im Rahmen der Sektorenkopplung kommen Batteriespeicher zum Einsatz, die eine Zwischenspeicherung des erzeugten Stroms ermöglichen und dessen bedarfsgerechte Nutzung innerhalb des lokalen Projekts unterstützen. Ziel ist es, das Potenzial von APV für semi-aride Regionen Marokkos systematisch zu evaluieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass APV nicht nur zur Erzeugung erneuerbarer Energie beiträgt, sondern auch positive agronomische Effekte mit sich bringt. Dazu gehören der Schutz vor Hitzestress, die Reduzierung von Spätfrostschäden und die Vorbeugung von Infektionen durch den Pathogen *Venturia inaequalis* (Apfelschorf). Zudem wird der Transpirationsbedarf der Pflanzen durch die reduzierte

direkte Sonneneinstrahlung verringert. Die ökonomische Rentabilität des Systems wird durch Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Electricity, LCOE) von 5,00 ct/kWh und eine Amortisationszeit von etwa 5,31 Jahren unter Berücksichtigung der Erlöse aus dem Apfelanbau belegt.

Die Studie kommt zu dem Schluss, dass APV einen integralen Beitrag zur Bewältigung der miteinander verknüpften Herausforderungen in den Bereichen Energie, Landwirtschaft und Klimawandel leisten kann. Für eine breite Umsetzung müssen jedoch technologische, finanzielle und institutionelle Hürden überwunden werden. Gezielte Fördermaßnahmen, geeignete Finanzierungsinstrumente, Weiterbildungsprogramme für Landwirte sowie klare regulatorische Rahmenbedingungen sind notwendig. Die langfristige Etablierung der Technologie erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen politischen Entscheidungsträgern, Forschungseinrichtungen, landwirtschaftlicher Praxis und Privatwirtschaft sowie die Sensibilisierung und Qualifizierung lokaler Akteure.

Abstract

Morocco is facing growing ecological and economic challenges due to climate change and its heavy dependence on imported fossil fuels. Climatic changes, such as rising temperatures, irregular rainfall, and frequent droughts, affect agricultural productivity, jeopardize food security, and threaten the livelihoods of rural populations. Meanwhile, the country relies on fossil fuels for over 90 percent of its primary energy needs, leaving it vulnerable to international price fluctuations and complicating the transition to sustainable development.

Against this backdrop, agrivoltaics (APV) is a promising solution. This technology enables the dual use of agricultural land for simultaneously producing food and solar power. This combined use of land can reduce water consumption, improve the microclimate, and strengthen the energy self-sufficiency of rural regions.

This study examines the technical and economic feasibility of an agrivoltaic system using a case study from Midelt, a prominent apple-growing region in the Moroccan highlands. Semi-transparent, bifacial photovoltaic modules were installed in a one-hectare area. The analysis includes the technical system design, as well as the integration of supplementary technologies. In particular, it focuses on rainwater harvesting systems that collect and store rainwater falling on the PV modules for reuse in agriculture. In a sector coupling approach, battery storage systems enable intermediate storage of the generated electricity and support its demand-oriented use within the local project. The goal is to systematically evaluate the potential of APV in semi-arid regions of Morocco.

The results show that agrivoltaics (APV) contribute to the generation of renewable energy and have positive agronomic effects. These include protection against heat stress and late frost damage, as well as preventing infections caused by the *Venturia inaequalis* pathogen, which causes apple scab. Additionally, transpiration by the plants and evaporation from the soil are reduced due to less exposure to direct sun-light. The system's economic viability is demonstrated by a levelled cost of electricity (LCOE) of 5.00 cents per kilowatt hour (kWh) and a payback period of around 5.31 years, taking into account income from apple cultivation.

The study concludes that APV can play a key role in overcoming the interconnected challenges of energy, agriculture, and climate change. However, technological, financial, and institutional hurdles must be overcome for widespread implementation. Targeted support measures, suitable financing instruments, training programs

for farmers, and a clear regulatory framework are necessary. Long-term establishment of the technology requires close cooperation between political decision-makers, research institutions, agricultural practitioners, and the private sector, as well as the sensitization and qualification of local stakeholders.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die offizielle Karte des Königreichs Marokko mit den geographischen Orten Marokkos	2
Abbildung 2: Prognostizierte Änderungen der Durchschnittstemperatur in Marokko für die drei Zeitpunkte unter RCP4.5 und RCP8.5	3
Abbildung 3: Karte der Projekte für erneuerbare Energie aus Sonne, Wind und Wasser in Marokko	5
Abbildung 4: Ungefähre durchschnittliche monatliche Sonnenscheindauer und Sonnenaufgangszeiten im Fall von Marrakesch, Marokko	12
Abbildung 5: Windkarte von Marokko.....	14
Abbildung 6: Ziel für den Anteil der erneuerbaren Energien an der gesamten Stromerzeugung in Marokko von 2020 bis 2050	20
Abbildung 7: Anteile der Wirtschaftssektoren Marokkos am Bruttoinlandsprodukt (BIP) von 2013 bis 2023.	22
Abbildung 8: Verteilung der Exporterlöse Marokkos nach Wirtschaftszweigen im Jahr 2023	28
Abbildung 9: Geschätzter Anteil der menschlichen Wassernutzung an der Wasserverfügbarkeit (Wasserstress) im Jahr 2050	30
Abbildung 10: Wasserzuflüsse Marokkos (in Milliarden m ³ /Jahr)	32
Abbildung 11: Verteilung der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Marokko im Jahr 2017 nach Art der Bewässerung	35
Abbildung 12: Verteilung der landwirtschaftlichen Nutzfläche LN nach Nutzungsart	37
Abbildung 13: Produktion landwirtschaftlicher Erzeugnisse in Marokko im Jahr 2023 nach Produkten.....	38
Abbildung 14: Verteilung der Produktion von Obstbäumen für das Jahr 2019..	40
Abbildung 15: Gemeldete Naturkatastrophen in Marokko 1970–2020.....	44
Abbildung 16: Ein theoretisches Beispiel, das ein getrenntes System von landwirtschaftlicher Nutzung und Freiflächenphotovoltaik mit einem integrierten Ansatz vergleicht, bei dem Ackerbau und Energieerzeugung durch APV auf derselben Fläche kombiniert werden.	47
Abbildung 17: Schematische Darstellung der verschiedenen Arten von APV-Systemen	49
Abbildung 18: APV-Testsysteme in Kenia und Tanzania	54
Abbildung 19: Klassifizierung von APV -Anlagen	56

Abbildung 20: Klassifikation verschiedener Agri-PV-Anwendungen	57
Abbildung 21: Darstellung APV Anlage Kategorie I nach DIN SPEC 91434:2021-05	59
Abbildung 22: Hoch aufgeständerte APV-Anlage.....	60
Abbildung 23: Darstellung APV Anlage Kategorie II Variante 1 nach DIN SPEC 91434:2021-05	61
Abbildung 24: Darstellung APV Anlage Kategorie II Variante 2 nach DIN SPEC 91434:2021-05	61
Abbildung 25: Bodennahe APV-Anlage im Ackerbau	62
Abbildung 26: APV-Anlage mit einem Tracking-System.....	63
Abbildung 27: Seilaufhängung im Rahmen des APV-Projekts „HyPErFarm“ in Straßkirchen	65
Abbildung 28: APV-Anlage mit tragender Unterkonstruktion aus behandeltem Holz	66
Abbildung 30: Leichte PV-Module	68
Abbildung 31: Konzepte für Konzentrator-Photovoltaik-Systeme (CPV).....	73
Abbildung 32: Direkte Verankerung von APV-Anlagen im Boden mittels Spinnankern.	74
Abbildung 33: Das Projektgebiet, die Provinz Midelt, markiert durch einen roten Kreis im Nordosten Marokkos.....	77
Abbildung 34: Jährliche Global Horizontal Insolation (GHI) in der Provinz Midelt, Marokko, basierend auf Daten des Global Solaratlas	79
Abbildung 35: Überarbeitete Darstellung der APV-Anlage mit Maßangaben....	81
Abbildung 36: Draufsicht auf die modellierte APV-Anlage.....	82
Abbildung 37: Flussdiagramm eines integrierten Wassermanagement-Ansatzes für APV-Systeme	86
Abbildung 38: Details RWH-System in der APV-Anlage in Alhéndin, Südspanien	87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die wichtigsten Energiekennzahlen Marokkos für das Jahr 2022	9
Tabelle 2: Große Solarenergie Projekte in Marokko in Betrieb und im Bau	13
Tabelle 3: Die Material- und Installationskosten für das Regenwassererntesystem (RWH) mit angeschlossenem Speicherteich	90
Tabelle 4: Installationskosten der APV-Anlage.....	91
Tabelle 5: Jährliche Betriebskosten (OPEX).	93
Tabelle 6: Jährliche Nettoeinnahmen aus Apfelertrag.	95

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom; Alternating Current
AFD	Französische Entwicklungsagentur; Agence Française de Développement
AG	Aktiengesellschaft
ANRE	Nationale Behörde für die Regulierung von Elektrizität; Autorité nationale de régulation de l'électricité
APV	Agri-Photovoltaik
ARC	Antireflexbeschichtung; Anti-Reflection Coating
BayWa	Bayerische Warenvermittlung landwirtschaftlicher Genossenschaften
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BIPV	Gebäudeintegrierte Photovoltaik; building integrated photovoltaic
BOS	Balance of System
CAPEX	Investitionskosten; Capital Expenditure
COP	Vertragsstaatenkonferenz; Conferences of the Parties
CPV	Konzentrierende Photovoltaik; Concentrator PhotoVoltaics
CSP	Konzentrierte Solarenergie; Concentrated Solar Power
DC	Gleichstrom; Direct Current
DIN	Deutsches Institut für Normung
ebd	ebenda
EIB	Europäische Investitionsbank; European Investment Bank
EIT	Europäisches Institut für Innovation und Technologie; European Institute of Innovation and Technology
EU	Europäische Union
FAO	Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen; Food and Agriculture Organization of United Nations
FFEM	Französischer Globaler Umweltfonds; Fonds Français pour l'Environnement Mondial
GHI	Global Horizontal Irradiation
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
HCP	Hohe Kommission für Planung; Haut Commissariat au Plan
IEA	Internationale Energieagentur; International Energy Agency
IFC	Internationale Finanz-Corporation; Internationale Finanz-Corporation
IRES	Königliches Institut für Strategische Studien; Institut Royal des Etudes Stratégiques
LCOE	Stromgestehungskosten; Levelized Cost of Electricity
LN	Landwirtschaftliche Nutzfläche
MAD	marokkanischer Dirham, Moroccan dirham
MASEN	Marokkanische Agentur für nachhaltige Energie; Moroccan Agency for Sustainable Energy
MEF	Ministerium für Wirtschaft und Finanzen; Ministère de l'Economie et des Finances
MEM	Ministerium für Energie und Bergbau; Ministère de l'Énergie et des Mines
MENA	Middle East North Africa; Naher Osten Nordafrika
MTEDD	Ministerium für Energiewende und nachhaltige Entwicklung; Ministère de la Transition énergétique et du Développement durable
NDCs	Nationale Klimabeiträge; Nationally Determined Contributions
O&M	Betrieb und Wartung; Operation & Maintenance
ONE	Nationales Amt für Elektrizität; Office National d'Electricité

ONEE	Staatliches Amt für Elektrizität und Trinkwasser ; Office National de l'Électricité et de l'Eau potable
OPEX	Betriebskosten; Operational Expenditure
OPV	Organische Photovoltaik
PAR	Phosynthetisch aktive Strahlung; Phosynthetically Active Radiation
PEV	Primärenergieverbrauch
PMV	Plan "Grünes Marokko"; Plan Maroc Vert
PNAEPI	Nationales Programm für Trinkwasserversorgung und Bewässerung; Programme National pour l'Approvisionnement en Eau Potable et l'Irrigation
PPA	Stromabnahmevertrag; Power Purchase Agreement
PR	Performance Ratio
PSW	Pumpspeicherkraftwerk
PV	Photovoltaik
PV-FFA	Photovoltaik-Freiflächenanlagen
PVOUT	Photovoltaische Leistung; Photovoltaic Power Output
PW	Potenzielles Wasservolumen
RES4Africa	Erneuerbare Energielösungen für Afrika; Renewable Energy Solutions for Africa
ROI	Kapitalrendite; Return on Investment
RWH	Rainwater Harvesting; Regenwassernutzung
SWT	Small Wind Turbine; Kleine Windturbine
THG	Treibhausgase
TPES	Total Primary Energy Supply; gesamter Primärenergieverbrauch
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change; Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen
US	Vereinigte Staaten; United States
USA	Vereinigte Staaten von Amerika; United States of America
USAID	Agentur der Vereinigten Staaten für internationale Entwicklung; United States Agency for International Development

1. Einleitung

Marokko ist sich der globalen Herausforderungen in den Bereichen erneuerbare Energien und Klimaschutz bewusst und hat sich für einen übergreifenden, integrierten und partizipatorischen Ansatz entschieden, um den Übergang zu einer grünen, wirtschaftlichen Entwicklung zu gewährleisten. Das Land ist weiterhin der Überzeugung, dass die Mobilisierung des Staates, die Attraktivität des Energiesektors, die Sensibilisierung der Öffentlichkeit und die Einbeziehung der gesamten Gesellschaft die vier treibenden Kräfte für den Übergang zu einer grünen Entwicklung und für die Gewährleistung der Widerstandsfähigkeit Marokkos gegenüber den Herausforderungen des Klimawandels und der Energieabhängigkeit sind. Dank seiner geografischen Lage und seines Potenzials an natürlichen Energiequellen ist Marokko auf dem besten Weg, seine Energiestrategie erfolgreich umzusetzen, indem es Großprojekte auf seinem Territorium realisiert und Gesetze zur Förderung der Energieerzeugung aus erneuerbaren Quellen verabschiedet.

1.1 Marokko

Offiziell das Königreich Marokko, ist ein Land in der Maghreb-Region Nordafrikas an der Mittelmeerküste mit geschätzten 37 Millionen Einwohnern (Abbildung 1) (HCP 2024). Das Territorium Marokkos beträgt etwa 710,8 Quadratkilometer, hinzu kommt die Küstenlinie von mehr als 3.500 Kilometern Länge (MTEDD 2020). Marokko liegt zwischen dem Atlantischen Ozean (im Westen), dem Mittelmeer (im Nordosten), der Sahara (im Süden) und Europa (im Norden) (Abbildung 1). Darüber hinaus verfügt es über eine strategische, geografische Lage mit einer großen Vielfalt an Reliefs: das Atlas-Gebirge mit Gipfeln von über 4.000 m, Wüste und Palmenhaine (ebd.). Mit mehr als 3.500 km Küstenlinie profitiert es auch von einer wichtigen Meeresfront, die sich auf das Klima, den Handel und die Küstenurbanisierung auswirkt (Snoussi et al. 2011).

Die geografische Lage Marokkos liegt zwischen zwei Hauptklimazonen (MTEDD 2020). Der Norden, der hauptsächlich aus Küstenebenen und Tieflandplateaus besteht, steht unter dem Einfluss des mediterranen und atlantischen Klimas und ist mit starken Klimaschwankungen zwischen dem Atlasgebirge und der Küste konfrontiert (ebd.). Der Süden besteht aus semiariden Graslandschaften bis hin zu Trockengebieten, die in die Sahara übergehen (ebd.). Diese Situation hat

erhebliche Auswirkungen auf die Wasserressourcen, die landwirtschaftliche Produktion und die gesamte Vegetation des Landes (Ouassanouan et al. 2022).

Wasserressourcen, die durch räumliche und zeitliche Knappheit und Unregelmäßigkeiten gekennzeichnet sind, stehen aufgrund des Bevölkerungswachstums, der Ausweitung der Bewässerungslandwirtschaft sowie der städtischen Industrie- und Tourismusentwicklung zunehmend unter Druck (ebd.).



Abbildung 1: Die offizielle Karte des Königreichs Marokko mit den geographischen Orten Marokkos (MAP Express 2024).

Studien zur Vorhersage des Klimawandels und der globalen Erwärmung haben gezeigt, dass Marokko zu den Ländern gehört, die am stärksten vom Klimawandel bedroht sind, da das Land als Hotspot für die Auswirkungen des Klimawandels im Mittelmeerraum gilt (Abbildung 2) (Kousksou et al. 2015b; Harbouze et al. 2019).

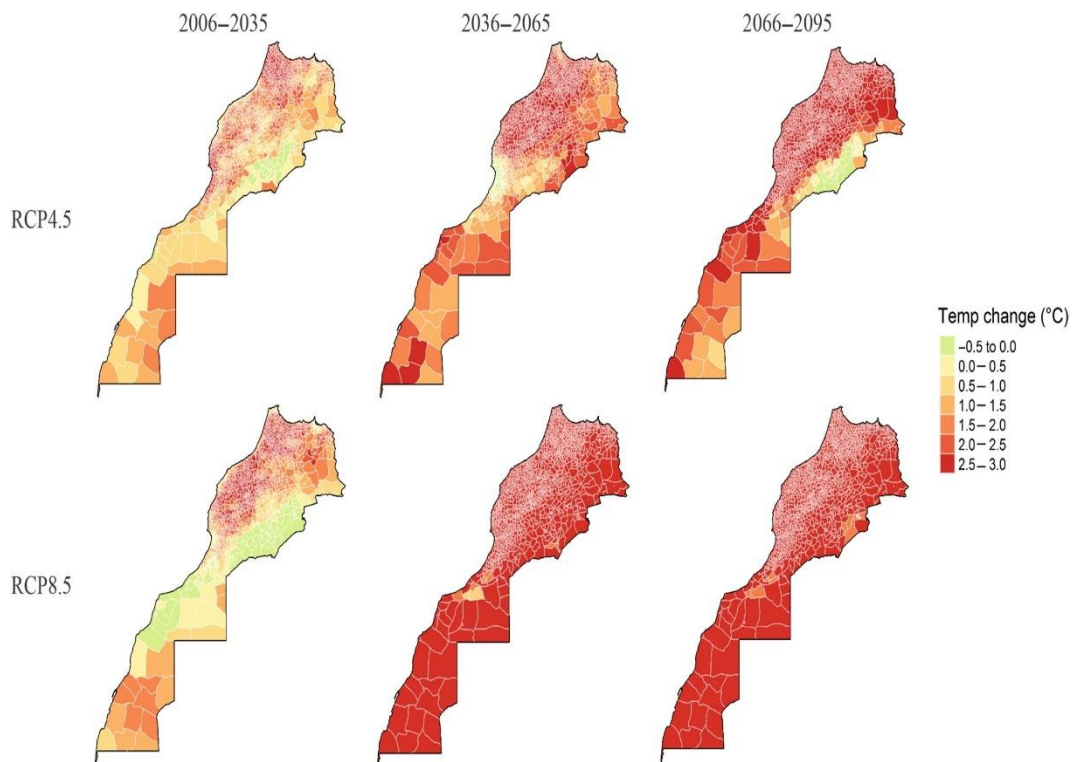


Abbildung 2: Prognostizierte Änderungen der Durchschnittstemperatur in Marokko für die drei Zeitpunkte unter (Repräsentativer Konzentrationpfad) RCP4.5 und RCP8.5. Von links nach rechts sind die Zeiträume 2006–2035, 2036–2065 und 2066–2095 abgebildet. Die obere Reihe bezieht sich auf das RCP4.5-Szenario, die untere Reihe auf das RCP8.5-Szenario. Eine Farbskala zeigt Temperaturänderungen von -0,5 °C bis 3,0 °C an (Meliho et al. 2023).

Laut International Energy Agency (IEA) wurden die Treibhausgasemissionen Marokkos aus der Kraftstoffverbrennung im Jahr 2000 auf etwa 29,5 Millionen Tonnen CO₂ geschätzt und dürften schnell ansteigen (mehr als das Doppelte bis zum Jahr 2021; 67,4 Millionen Tonnen CO₂) (IEA 2024). Dieser Anstieg ist hauptsächlich auf das Wachstum des Wohnsektors und des Energiesektors zurückzuführen (Kousksou et al. 2015b).

Marokko ist eines der wasserärmsten Länder des Nahen Ostens und Nordafrikas (RES4Africa 2023b). Achtzig Prozent des marokkanischen Territoriums sind arid bis semiarid (ebd.). Durch den Rückgang der Niederschläge und die damit verbundene geringere Wasserführung der Flüsse, das Bevölkerungswachstum und die

starke wirtschaftliche Entwicklung stehen die Wasserressourcen unter starkem Druck (ebd.). Die Wasserverfügbarkeit in Marokko ist von 730 m³ pro Person im Jahr 2005 auf 645 m³ pro Person im Jahr 2015 gesunken und wird bis 2050 voraussichtlich auf 510 m³ pro Person und Jahr zurückgehen (ebd.). Das Königreich verfolgt eine ehrgeizige Strategie, die mehrere Aspekte der Wertschöpfungskette im Wassersektor umfasst, darunter den Bau mehrerer Entsalzungsanlagen (ebd.).

Entsalzung ist ein Wasseraufbereitungsprozess, bei der Salze aus Salzwasser entfernt werden, so dass ein Ausgangsstrom aus Süßwasser und einigen Rückständen entsteht. Dies ist in der Regel ein energieintensiver Prozess, der derzeit hauptsächlich mit fossilen Brennstoffen betrieben wird (mit einem weltweiten CO₂-Ausstoß von etwa 76 Millionen Tonnen pro Jahr) (ebd.). Demzufolge könnte dies ein Risiko für Klima und Umwelt darstellen, wenn keine geeigneten Maßnahmen ergriffen werden (ebd.). Eine der effektivsten Möglichkeiten, um Emissionen zu reduzieren, besteht darin, Entsalzungsanlagen mit erneuerbaren Energiequellen wie Wind, Sonne, Erdwärme und anderen zu koppeln, um die benötigte, saubere Energie zu erzeugen (ebd.).

Dies trifft insbesondere auf Marokko zu. Das Land verfügt über ein enormes Wind- und Solarenergiepotenzial, eine solide Führungsposition bei der Installation und dem Management erneuerbarer Energien und die technischen Kapazitäten, um weitere Fortschritte in diesem Bereich zu erforschen (ebd.). Angesichts der steigenden Preise für fossile Brennstoffe und der sinkenden Kosten für erneuerbare Energien scheint dies auch eine kosteneffiziente Lösung zu sein (ebd.).

2. Erneuerbare Energien in Marokko

Erneuerbare Energien sind eine nachhaltige, unbegrenzte und kohlenstofffreie Lösung für die Energieherausforderungen der Zukunft. In diesem Zusammenhang hat Marokko einen großen Vorteil, sich auf diesem vielversprechenden Markt zu positionieren. Darüber hinaus wurden die erneuerbaren Energien als wichtige strategische Quelle für das grüne Wachstum des Landes hervorgehoben (Boulakhbar et al. 2020). Marokko hat den Weg der erneuerbaren Energien mit einer Strategie zur Entwicklung von Solar-, Wind- und Wasserkraft eingeschlagen, um seine Energiepolitik an die Herausforderungen der heutigen Welt anzupassen (ebd.).

Der Sektor der erneuerbaren Energien in Marokko ist vielfältig und umfasst Solar-, Wind- und Wasserkraftwerke. Abbildung 3 zeigt die installierte und geplante Gesamtkapazität dieser Energiequellen für die Jahre 2018 und 2024.

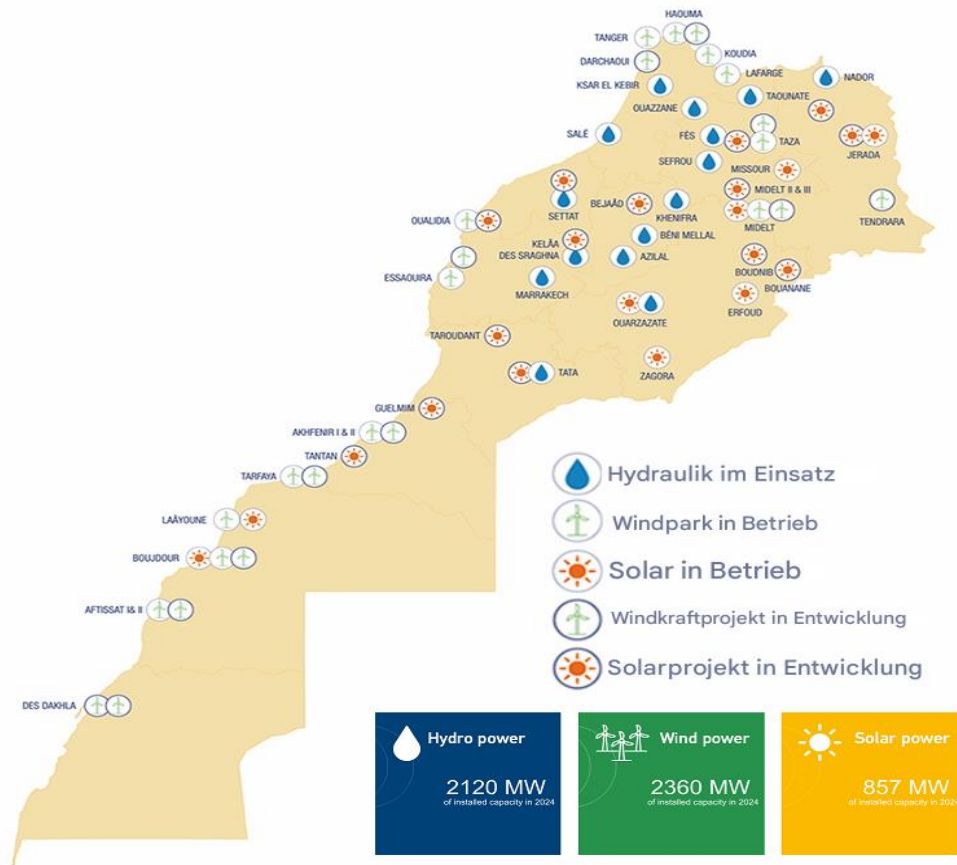


Abbildung 3: Karte der Projekte für erneuerbare Energie aus Sonne, Wind und Wasser in Marokko (Masen 2024).

Um seinen Energiebedarf zu decken, ist das Land heute stark von Gas- und Ölimporten abhängig - zu hohen Kosten (Nakach et al. 2023). Erneuerbare Energien haben das Potenzial, dem Land nicht nur bei der Erreichung seiner wirtschaftlichen Wachstumsziele zu helfen, sondern auch bei der Bekämpfung des Klimawandels (ebd.). Marokko verfügt über zahlreiche erneuerbare Energiequellen wie Wasserkraft, Sonnen- und Windenergie. Aufgrund der geografischen Lage des Landes sind Solar- und Windenergie in Marokko besonders vielversprechend. Die marokkanische Agentur für nachhaltige Energie (MASEN) ist federführend bei der Entwicklung der Solarenergie im Land, und zahlreiche große Solarkraftwerke befinden sich im Bau (ebd.).

Es wird deutlich, dass der marokkanische Energiesektor sehr kohlenstoffintensiv ist, wobei fossile Brennstoffe fast 90 % des gesamten Primärenergieverbrauchs

(PEV) ausmachen (Chegari 2022). Öl ist nach wie vor die stärkste Triebkraft für das gesamte Primärenergieverbrauch (TPES)-Wachstum und machte im Jahr 2017 62 % des PEV aus, gefolgt von Kohle (22 %) und Erdgas (5 %) (IEA 2019a). Fast alle fossilen Brennstoffe werden importiert, und diese starke Abhängigkeit von Energieimporten hat deutliche Auswirkungen auf die Energiesicherheit von Marokko (ebd.).

Im Jahr 2009 verabschiedete Marokko eine Energiestrategie, die vor allem auf erneuerbaren Energien, der Entwicklung der Energieeffizienz sowie der Stärkung der regionalen Integration basiert (MEM 2024b). Diese Strategie hat sich als effektiv und relevant erwiesen und hat es Marokko ermöglicht, ein Land zu werden, das erneuerbare Energiequellen nutzt, obwohl es zuvor vollständig von ausländischen fossilen Brennstoffen abhängig war (ebd.). Die Strategie ist in Programme mit klaren Zielen unterteilt und wird von gezielten gesetzlichen und institutionellen Reformen begleitet (ebd.).

Marokko hat eine nationale Strategie zur Entwicklung seines Energiesektors mit Schwerpunkt auf Windenergie umgesetzt, mit dem Ziel, bis 2030 52 % seines Stroms aus Windkraft zu erzeugen (ebd.). Diese Vision trägt erste Früchte: 111 Projekte im Bereich der erneuerbaren Energien sind bereits abgeschlossen oder befinden sich in der Entwicklung (ebd.). Die installierte Kapazität erneuerbarer Energien hat damit 4672 MW erreicht, was etwa 40 % des Strommixes entspricht (831 MW aus Solarenergie, 2071 MW aus Windenergie und 1770 MW aus Wasserkraft) (ONEE 2024a).

Im Oktober 2024 hat die Gesamtkapazität an erneuerbaren Energien im Königreich Marokko 5.440 MW erreicht, davon 2.400 MW aus Windkraft, was 45 % der nationalen Stromerzeugungskapazität entspricht (ONEE 2024b). Es wird ein integriertes Programm entwickelt, das geplante Entsalzungsanlagen mit Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien kombiniert, um den Bedarf der Bevölkerung und der Landwirtschaft an Trink- und Bewässerungswasser zu decken (MEM 2024b).

Marokko hat darüber hinaus mehrere, ehrgeizige Projekte auf den Weg gebracht, darunter den „Le Plan Solaire marocain“, eine Investition in Höhe von 9 Milliarden United States Dollar (US-Dollar) für die Entwicklung einer Kapazität von 2 GW für Solarenergie, und den „Plan Grünes Marokko“ (Plan Maroc Vert, PMV), eine Investition in Höhe von 2 Milliarden US-Dollar für die Entwicklung von Kapazitäten für Wind-, Wasser- und Solarenergie (Laaroussi et al. 2023). Außerdem wurde

MASEN gegründet, um die Nutzung von Solarenergie zu fördern und groß angelegte Solarenergieprojekte wie NOOR 1 zu entwickeln (ebd.). Infolgedessen hat sich Marokko zu einem führenden Land im Bereich der erneuerbaren Energien in Afrika und im Nahen Osten entwickelt (ebd.).

2.1 Politik

Im Jahr 2009 verabschiedete Marokko eine nationale Energiestrategie als Fahrplan für den Übergang zu einem kohlenstoffarmen Energiesystem, das die wirtschaftliche Entwicklung mit sozialen und ökologischen Zielen in Einklang bringt (IEA 2019a). Die Energiestrategie legt fünf Prioritäten für die marokkanische Energiepolitik fest: Sie betreffen die Entwicklung eines diversifizierten und optimierten Energiemixes, die Mobilisierung einheimischer Ressourcen einschließlich der Nutzung erneuerbarer Energien (Wind/Solar), die Erhebung der Energieeffizienz zu einer nationalen Priorität, die Stärkung der regionalen Zusammenarbeit mit den Energiemärkten Europas und Afrikas sowie die industrielle Integration, die die Entwicklung lokaler industrieller Kapazitäten auf allen Ebenen der Wertschöpfungskette für grüne Technologien fördert (ebd.).

Zunächst soll im Rahmen des Eigenerzeugungssystems die Entwicklung der Gesetzgebung in diesem Bereich kurz dargestellt werden, wobei der Schwerpunkt auf dem jüngsten Gesetz Nr. 82-21 liegt, das am 27. Februar 2023 verkündet wurde und am 27. Mai 2023 in Kraft getreten ist (Conseil de la concurrence 2024). Auf gesetzlicher Ebene trat das Eigenerzeugungssystem erstmals 1994 mit der Verabschiedung der Rechtsverordnung Nr. 2-94-503 von 1994 zur Gründung der „Staatliches Amt für Elektrizität und Trinkwasser“ (ONEE) in Kraft (ebd.). Dieses Gesetz ermöglichte die Installation von Stromerzeugungsanlagen mit einer Kapazität von bis zu 10 MW unter der Bedingung, dass die Produktion ausschließlich vom Erzeuger genutzt wird (ebd.).

Im Jahr 2008 wurde der Schwellenwert von 10 MW auf 50 MW angehoben. Mit dem Gesetz Nr. 54-14 wurde der Zugang zum Übertragungsnetz für Eigenerzeuger mit einer Leistung von mehr als 300 MW ermöglicht (ebd.). Die Überschussproduktion muss an das ONEE verkauft werden, wenn sie nicht für den Eigenbedarf verwendet wird (ebd.). Die Bedingungen dafür sind in einer Vereinbarung festgelegt (ebd.). Im Februar 2023 wurde ein Gesetz über die Eigenerzeugung von Strom verabschiedet. Die Eigenerzeugung wird unabhängig von der Art der Erzeugungsquelle und ohne Einschränkungen hinsichtlich der Kapazität der Anlage oder

der Art des Netzes geregelt (ebd.). Diese Regelung steht allen natürlichen oder juristischen Personen offen, sofern die Sicherheit des nationalen Stromnetzes nicht beeinträchtigt wird (ebd.). Ausgenommen sind insbesondere Betreiber von Stromübertragungs- und Verteilungsnetzen sowie Betreiber von Produktionsstätten, die dem Gesetz Nr. 13-09 unterliegen (ebd.).

Diese Regelung steht allen Personen des privaten oder öffentlichen Rechts offen, mit Ausnahme der Betreiber von Stromnetzen und Produktionsanlagen (ebd.). Das Gesetz ermöglicht Eigenerzeugern, bis zu 20 % ihrer Jahresproduktion an den Netzbetreiber zu verkaufen (ebd.). Die Tarife werden von der „Nationale Behörde für die Regulierung von Elektrizität“ ANRE festgelegt. Artikel 3 des Gesetzes besagt, dass alle Projekte für Eigenerzeugungsanlagen, die nicht an das Netz angeschlossen sind, bei der Verwaltung angemeldet werden müssen (ebd.).

Marokko hat im letzten Jahrzehnt eine Vorreiterrolle bei der Energiewende eingenommen. Dies zeigt sich in den ehrgeizigen Klimaschutzverpflichtungen, die bei der UNFCCC-Vertragsstaatenkonferenz COP16 in Paris und der COP21 in Glasgow vorgelegt wurden und zu den ehrgeizigsten der Welt zählen, in der Festlegung eines Ziels von 52 % für erneuerbare Energien bis 2030 und in der Inbetriebnahme des weltweiten größten Concentrated Solar Power (CSP)-Kraftwerks (MEM 2021a). Im Rahmen seiner auf der COP 16 vorgelegten, nationalen Klimabeiträge (NDCs) verpflichtete sich Marokko, seine Treibhausgasemissionen (THG) bis 2030 bedingungslos um 17 % und bedingt um 42 % zu senken (ebd.). Diese Ziele wurden kürzlich durch das aktualisierte marokkanische NDCs verschärft, dass eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 45,5 % bis 2030 anstrebt, wovon 18,3 % bedingungslos sind und der Rest von internationaler Hilfe abhängt (ebd.). Das marokkanische NDCs umfasst alle Wirtschaftssektoren und setzt stark auf die Transformation des Energiesektors weg von Öl und Kohle hin zu erneuerbaren Energiequellen und die Verbesserung der Energieeffizienz in den verbrauchenden Sektoren (ebd.).

2.2 Energieabhängigkeit in Marokko

Konventionelle Energiequellen wie Kohle, Erdöl und andere Brennstoffe haben negative Auswirkungen auf die Umwelt und die Wirtschaft (Wang und Azam 2024). Marokko verfügt nur über begrenzte Öl- und Gasreserven, was die Deckung des Energiebedarfs erschwert (Bakkari et al. 2023). Marokko importiert ca. 89,50% seines Energiebedarfs, was zu hohen Kosten führt (MEM 2024a) (Tabelle 1). Das

Land ist sich der Bedeutung der Entwicklung sauberer und erneuerbarer Energie-ressourcen bewusst, um die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und die Energiesicherheit zu verbessern (El Hafdaoui et al. 2024). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass viele Faktoren, wie die begrenzten Ölreserven, die hohen Kosten für Energieimporte, die reichlich vorhandenen Windressourcen und die Ziele der nachhaltigen Entwicklung, Marokko dazu veranlasst haben, sich erneuerbaren Energien zuzuwenden, insbesondere der Windenergie, um seinen derzeitigen und zukünftigen Energiebedarf zu decken (Bakkari et al. 2023).

Tabelle 1: Die wichtigsten Energiekennzahlen Marokkos für das Jahr 2022 (MEM 2024a).

STATISTICS (2022)* CHIFFRES PROVISOIRS				
22.72	89.50	0.61	122	1188
ENERGY CONSUMPTION (MTOE)	LEVEL OF ENERGY DEPENDENCE (%)	ENERGY CONSUMPTION PER CAPTA (TOE / CAPITA)	ENERGY BILL IN BILLION MAD	DEMAND FOR ELECTRICITY PER CAPTA (KWH / HAB)

Trotz der Schwankungen bei der Stromerzeugung aus Wasserkraft (aufgrund von Niederschlagsschwankungen) ist die Energieabhängigkeit in den letzten 40 Jahren nie unter 86 % gefallen (Bennouna 2023). Nach 1999 (Einstellung der Kohleförderung in Jerada) und dem allmählichen Anstieg der Nachfrage, die durch Importe gedeckt wurde, stieg sie auf über 95 % (ebd.). Seit 2008 wird der Energieabhängigkeitsindex durch Investitionen in erneuerbare Energien langsam, aber sehr unregelmäßig gesenkt (ebd.).

Um Marokko unabhängig von fossilen Brennstoffen zu sein, sind mehrere Windenergieprojekte von nationalen und ausländischen Unternehmen und privaten Investoren im Gange oder wurden kürzlich abgeschlossen (Bakkari et al. 2023). Marokko setzt bei der Entwicklung von Windenergieprojekten auf internationale Zusammenarbeit und hat daher Partnerschaften mit Ländern und internationalen Partnern geschlossen, um die Investitionen zu erhöhen und den Technologietransfer im Bereich der Windenergie zu fördern (ebd.).

Marokko hat ein neues Programm verabschiedet, das darauf abzielt, alle geplanten Meerwasserentsalzungsanlagen mit Einheiten zur Erzeugung erneuerbarer Energie auszustatten, um sie autark zu machen und Energieeinsparungen zu

ermöglichen (MEM 2024b). Dieser Ansatz ist ein Schritt in Richtung Nachhaltigkeit und zeigt das Engagement Marokkos für erneuerbare Energien (ebd.).

Diese neue Strategie zielt darauf ab, neue Energiequellen zu erschließen, wie z.B. die Umwandlung von Abfällen (Biomasse) in den großen marokkanischen Städten und die Nutzung erneuerbarer Energien, wo immer dies möglich ist, und die Energieeffizienz in öffentlichen Gebäuden im Rahmen eines großen Programms zur Förderung der Vorbildfunktion des Staates zu maximieren (ebd.). Diese Vision trägt erste Früchte. Es wurden bereits 111 Projekte im Bereich der erneuerbaren Energien umgesetzt oder befinden sich in der Entwicklungsphase (ebd.). Der Energieabhängigkeitsgrad ist seit 2009 von 97,5% auf derzeit 90,51% gesunken (ebd.).

Darüber hinaus hat Marokko Kooperationsabkommen zur Entwicklung von Windkraftprojekten mit verschiedenen Ländern unterzeichnet, insbesondere mit europäischen Ländern wie Frankreich, Spanien und Deutschland, die über fortschrittliche Technologien und große Erfahrung in der Entwicklung erneuerbarer Energien verfügen (Bakkari et al. 2023). Zudem hat Marokko Partnerschaften mit internationalen Organisationen wie der United States Agency for International Development (USAID) und der Agence Française de Développement (AFD) geschlossen, um die Entwicklung von Windkraftprojekten und Investitionen in erneuerbare Energien zu unterstützen (ebd.).

Marokko beteiligt sich auch an internationalen Initiativen zur Förderung der Entwicklung erneuerbarer Energien, wie z.B. der DESERTEC-Initiative, deren Ziel es ist, erneuerbare Energien in Wüstenregionen für die Nutzung in Europa und Nordafrika zu entwickeln (ebd.). Bis Ende 2024 werden Windenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von 2.373 MW installiert sein (Naim 2025). Außerdem befinden sich weitere Windkraftprojekte in der Entwicklung, die von marokkanischen Behörden, privaten Investoren und ausländischen Unternehmen unterstützt werden, um die installierte Windkraftkapazität im Land zu erhöhen (Bakkari et al. 2023; Masen 2024). Das Land strebt bis 2030 eine installierte Windenergieleistung von rund 4.200 MW an (IEA 2019b).

2.3 Technik und Potenzial

Marokko verfügt über ein außergewöhnliches Potenzial im Bereich der erneuerbaren Energien, hauptsächlich im Bereich der Solar- und Windenergie (Azeroual et al. 2018). Marokko ist gut positioniert, um das Ziel von 52% der installierten

Stromkapazität aus erneuerbaren Energien bis 2030 zu erreichen, davon 4.560 MW aus Solarenergie, 4.200 MW aus Windkraft und 1.330 MW aus Wasserkraft (ebd.). Die Ergebnisse der Prognose zeigen, dass der Energieverbrauch zwischen 2016 und 2030 kontinuierlich ansteigen wird (Azeroual et al. 2018).

Marokko hat sich bisher auf Solar-, Wind- und Wasserkraft konzentriert. Damit ist es Vorreiter in diesem Bereich (García und Leidreiter 2016). Im Jahr 2021 sollen 18,1 % des Energiebedarfs des Landes durch erneuerbare Energien gedeckt werden (ANRE 2022). Es gibt jedoch noch viele Hindernisse zu überwinden, angefangen bei der Senkung der Energierechnungen durch die Verringerung der Energieverschwendung mittels energieeffizienter Strategien und spezifischer Maßnahmen, die sich an erfolgreichen Projekten in Industrie- und Entwicklungsländern orientieren (Nakach et al. 2023).

Das Land hat verschiedene Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien entwickelt und umgesetzt. Im Folgenden sind einige der wichtigsten Technologien aufgeführt, die in Marokko im Bereich der erneuerbaren Energien eingesetzt werden.

2.3.1 Solarenergie

Marokko befindet sich in einer Region mit einem hohen, solaren Potenzial. Das Gebiet profitiert von durchschnittlich 3.000 Sonnenstunden pro Jahr, in der Wüste sogar von bis zu 3.600 Stunden (Benbba et al. 2024). Die durchschnittliche Sonneneinstrahlung schwankt zwischen 4,7 und 5,6 kWh/m²xTag bei einer Sonnenscheindauer von 2.700 Stunden/Jahr im Norden Marokkos und mehr als 3.500 Stunden/Jahr im Süden (Boulakhbar et al. 2020).

Die tägliche Sonnenscheindauer beträgt im Winter 5 bis 6 Stunden und im Sommer 11 bis 12 Stunden (Benbba et al. 2024). Dabei ist zu beachten, dass die Zeiten für Sonnenaufgang und Sonnenuntergang je nach Entfernung vom Äquator von Stadt zu Stadt variieren (ebd.). Abbildung 4 zeigt die Sonnenaufgangszeiten und die durchschnittliche monatliche Sonnenscheindauer für Marrakesch, Marokko. Die Stadt liegt bei 31,63 Grad nördlicher Breite und hat ein semiarides Mittelmeerklima mit heißen, trockenen Sommern und milden Wintern (ebd.). In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass Marokko ein einzigartiger Standort ist, um die CSP-

Technologie zu nutzen, die über ein Netto-Gesamtpotenzial von über 8.000 TWh/Jahr verfügt (Moser et al. 2013).

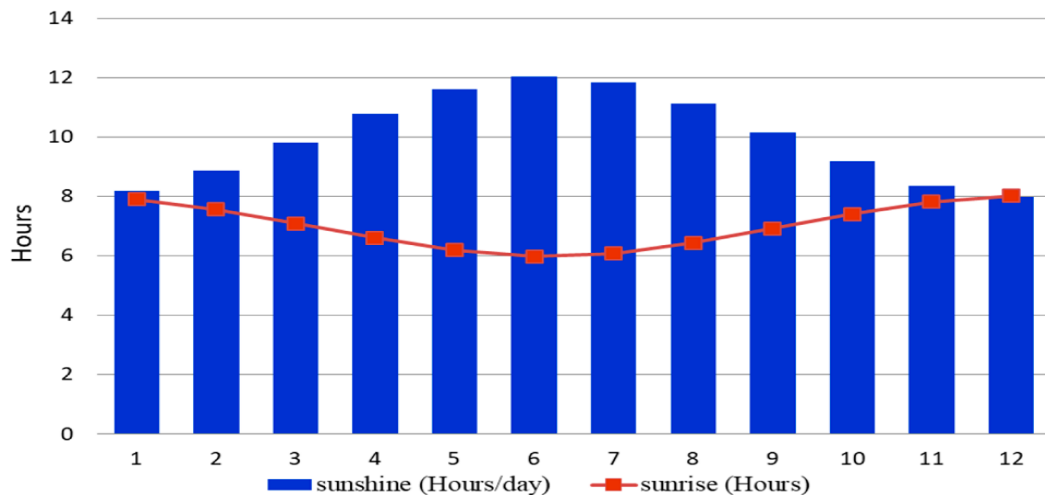


Abbildung 4: Ungefähre durchschnittliche monatliche Sonnenscheindauer und Sonnenaufgangszeiten im Fall von Marrakesch, Marokko (Benbba et al. 2024).

Solarenergie in Marokko kann durch drei Haupttechnologien erzeugt werden:

Erstens wandeln PV-Systeme die Sonnenstrahlung mit Hilfe von Solarzellen aus Halbleitermaterialien direkt in Elektrizität um (Benbba et al. 2024). Diese Systeme sind aufgrund ihrer einfachen Funktionsweise und ihres Wirkungsgrads weit verbreitet, insbesondere bei kleinen und mittleren Anwendungen (ebd.). Ihre kontinuierliche Weiterentwicklung hat zu vertretbaren Kosten auf dem Markt geführt (ebd.).

Zweitens ist die Technologie solarthermische Systeme, die die Sonnenenergie zur Erwärmung von Wasser oder Luft für häusliche, gewerbliche oder industrielle Anwendungen nutzen (ebd.).

Drittens ist die Technologie solarthermische Systeme (CSP) (ebd.). Dabei werden die Sonnenstrahlen mit Hilfe von Spiegeln auf einen Brennpunkt (Solartürme und Dish-Stirling-Systeme) oder eine Brennnlinie (wie bei Fresnel-Spiegeln oder Parabolrinnen-Systemen) reflektiert, wodurch ein Wärmeträgermedium auf hohe Temperaturen erhitzt wird (ebd.). Diese Flüssigkeit wird dann im Kraftwerksblock zur Erzeugung von Dampf verwendet, der Turbinen zur Stromerzeugung antreibt (ebd.). All diese Technologien leisten einen wichtigen Beitrag zur Nutzung der Solarenergie und zur Entwicklung erneuerbarer Energien auf verschiedenen Ebenen im privaten und öffentlichen Sektor Marokkos (ebd.). In Tabelle 2 sind die größten Solarprojekte in Marokko und ihre Erzeugungskapazitäten dargestellt.

Der Solarkomplex Noor Ouarzazate ist das bisher größte Solarenergieprojekt in Marokko (Masen 2017b; Ryser 2019). Es liegt etwa 10 Kilometer von der Stadt Ouarzazate entfernt (ebd.). In diesem Gebiet gibt es nur etwa 30 Tage Niederschlag im Jahr, so dass etwa 330 Tage Sonnenlicht zur Verfügung stehen (Spinola 2017). Ein Großteil von Noor nutzt konzentrierte Solarenergie (CSP) (Weltbank 2017a).

Tabelle 2: Große Solarenergie Projekte in Marokko in Betrieb und im Bau [überarbeitet nach (Benbba et al. 2024)].

Project Name	Installed Capacity/Annual Production/LCOE	Location	Technology/Storage Technology	Investment Cost (Million MAD)	Planned Start-Up Date
Ain Beni Mathar	20 MW/55 GWh/yr/2.4 MAD/kWh	Beni Mathar	ISCC + parabolic trough	-	2018
Noor Ouarzazate I	160 MW/618 GWh/yr/1.62 MAD/kWh	Ouarzazate	CSP (parabolic trough) 3 h of storage molten salt with two tanks	7000	2016
Noor Ouarzazate II	200 MW/600 GWh/yr 1.36 MAD/kWh	Ouarzazate	parabolic trough + dry cooling 7 h of storage molten salt with two tanks	9218	2018
Noor Ouarzazate III	150 MW/500 GWh/yr 1.42 MAD/kWh	Ouarzazate	CSP power tower + dry cooling 7 h of storage molten salt with two tanks	7180	2018
Noor Ouarzazate IV	72 MW/120 GWh/yr 0.46 MAD/kWh	Ouarzazate	polycrystalline PV with tracking	775	2018
Noor Laayoune I	85 MW/200 GWh/yr 0.46 MAD/kWh	Laayoune	polycrystalline PV with tracking	968	2018
Noor Boujdour I	20 MW/45 GWh/yr 0.46 MAD/kWh	Boujdour	polycrystalline PV with tracking	302	2018
Noor Boujdour II	350 MW		polycrystalline PV	-	Will be operational by 2027)
Noor Tafilalet	120 MW/220 GWh/yr	Erfoud	polycrystalline PV	1200	Late 2020
		Missour			2021
		Zagora			2021
Noor Midelt I	800 MW ≈0.68 MAD/kWh	Midelt	hybrid system CSP parabolic trough (300 MW)/PV (500 MW) 5 h of storage	7572	Planned for 2024
Noor Midelt II	400 to 800 MW				Plan on the horizon for 2030
Noor Atlas	200 MW distributed over eight power plants of 30 to 40 MW. 320 GWh/yr.	Boudnib, Bouanane, Outat El Haj, Enjil, Ain Beni Mathar, Tata, and Tan Tan.	polycrystalline PV	2000	Constructed in 2021 Planned for 2024

Der Gesamtkomplex besteht aus vier Solarkraftwerken: Noor I, II, III und IV (Power Technology 2020). Zusammen erreichen sie eine installierte Leistung von rund 580 Megawatt (MW) (ebd.). Noor I mit 160 MW wurde im Februar 2016 in Betrieb genommen (ebd.). Noor II (200 MW) und Noor III (150 MW) folgten 2018 (ebd.). Noor IV, das auf PV-Technologie basiert, ergänzt den Komplex um weitere 70 MW (ebd.). Das Projekt hat 2,4 Milliarden US-Dollar gekostet und wird von einer Koalition aus Weltbank, Europäischer Union (EU) sowie deutschen und saudischen Unternehmen finanziert (Weltbank 2017a). Marokko trägt rund 25 Prozent der Projektkosten (ebd.).

2.3.2 Windenergie

Marokko verfügt aufgrund seiner günstigen geographischen Lage über ein großes Windenergiepotenzial. Es verfügt über eine 3.500 km lange Küste mit Windgeschwindigkeiten von bis zu 10 m/s (El Khchine et al. 2019). Schätzungen der Weltbankgruppe zum technischen Offshore-Windpotenzial Marokkos gehen davon aus, dass das Land über eine potenzielle Offshore-Windkapazität von 200 GW verfügt, von denen „nur“ 22 GW am besten für Onshore-Windturbinen geeignet sind, während die restlichen 178 GW am besten mit schwimmenden Windkraftanlagen erschlossen werden können (Weltbank 2020).

Die windreichsten Regionen Marokkos befinden sich im äußersten Norden an der Straße von Gibraltar in der Region Tanger-Tetouan, in der Region Essaouira, in der südatlantischen Region von Tarfaya bis Lagouira und im Taza-Korridor zwischen Atlasgebirge und Rif (Abbildung 5) (Kousksou et al. 2015a).

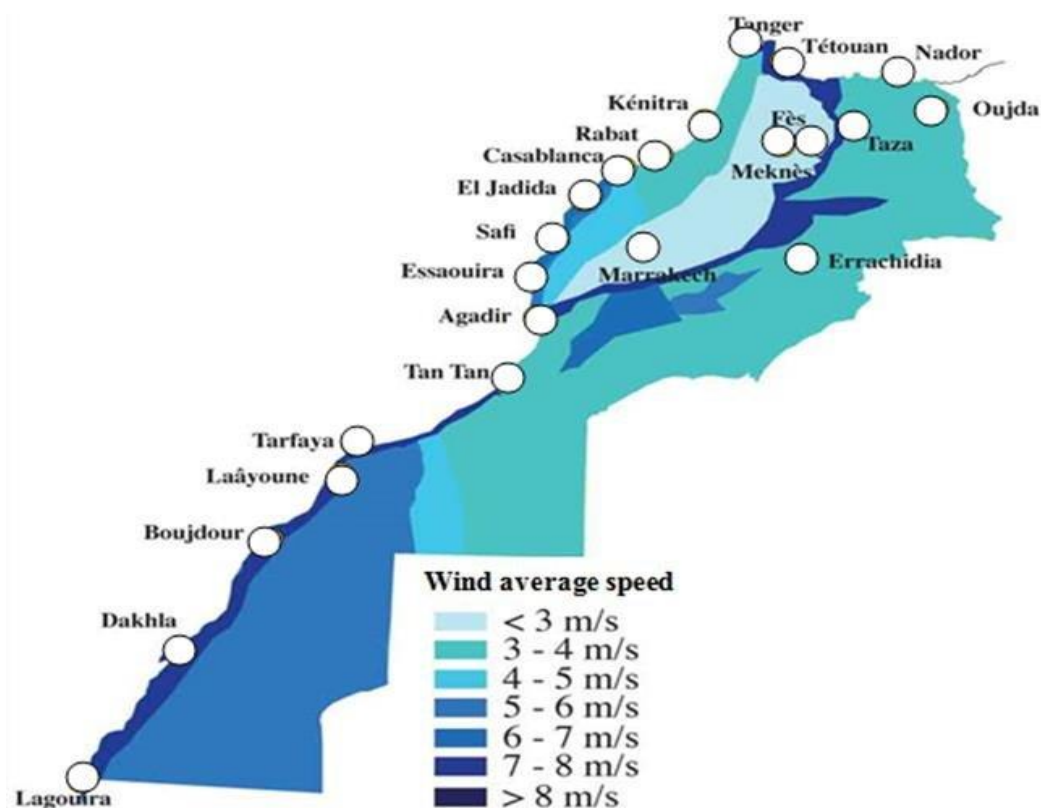


Abbildung 5: Windkarte von Marokko (Haidi et al. 2021).

Die ONEE hat den Windpark Jbel Lahdid in der Provinz Essaouira mit einer Leistung von 270 MW in Betrieb genommen (ONEE 2024b). Mit dieser neuen Errungenschaft erreicht die Gesamtkapazität erneuerbarer Energien im Königreich

Marokko nun 5.440 MW, davon 2.400 MW aus Windkraft, was 45 % der nationalen Stromerzeugungskapazität entspricht (ebd.).

In Bezug auf Windenergie hat Marokko verschiedene Technologien eingesetzt, um das Windenergiepotenzial des Landes zu nutzen. Eines der wichtigsten Projekte im Windenergieprogramm ist der riesige Windpark Tarfaya an der Atlantikküste, der beispielsweise 131 Turbinen mit einer Gesamtleistung von 301 MW nutzt (The Wind Power 2024). Die Turbinen sind vom Typ Siemens SWT-2.3-101 (Leistung 2.300 kW, Durchmesser 101 m), die für niedrige Windgeschwindigkeiten ausgelegt sind (ebd.). Ein weiteres Beispiel: Der Windpark Khalladi besteht aus 40 Windturbinen mit einer Leistung von je 3 MW und einer potenziellen Gesamtleistung von 120 MW (ebd.). Das Modell der Windturbinen entspricht einer Vestas V90-3000 mit 40 Turbinen: (Leistung 3.000 kW, Durchmesser 90 m) (ebd.).

Die Nabenhöhen der in Marokko eingesetzten Windenergieanlagen liegen in der Regel zwischen 100 und 150 Metern (Sierra et al. 2016). Eine im Jahr 2020 veröffentlichte Studie von MASEN hat das Windpotenzial in Marokko untersucht. Demnach verfügt Marokko über ein Windpotenzial von fast 8 GW, vor allem in den Küstenregionen und im Süden des Landes (El Khchine et al. 2019). Die Studie zeigte auch, dass Marokko fast 30 TW/h Windenergie pro Jahr erzeugen könnte, was etwa 20% dem Gesamtverbrauch des Landes entspricht (ebd.). Der Studienbericht betonte auch, dass die Entwicklung der Windenergie in Marokko wirksam zur Erreichung der Ziele der Reduzierung der Treibhausgasemissionen und zur Verbesserung der Energiesicherheit beiträgt (ebd.).

Marokko wird auch seinen ersten Offshore-Windpark entwickeln. Die Europäische Investitionsbank (EIB) hat eine Ausschreibung für technische Hilfe zur Durchführung einer Machbarkeitsstudie in einem Gebiet vor der Atlantikküste Marokkos für das erste Offshore-Windkraftprojekt des Landes veröffentlicht (EIB 2022). Mit einem Zuschuss der EIB in Höhe von 2 Millionen EUR wird eine von MASEN durchgeführte Machbarkeitsstudie finanziert (ebd.). Diese technische Unterstützung wird zu einem besseren Verständnis des Offshore-Windenergiepotenzials vor der marokkanischen Atlantikküste beitragen (ebd.).

Das 850-MW-Integrated-Wind-Programm besteht aus den Windparks „Midelt - 210 MW“, „Boujdour - 300 MW“, „Jbel Lahdid - 270 MW“ und „Tiskrad - in Tarfaya - 100 MW“ und ist ein wichtiger Bestandteil der nationalen Energiestrategie, deren Ziel es ist, bis 2030 52 % der installierten elektrischen Leistung aus erneuerbaren

Energien zu gewinnen (MEM 2020). Die prognostizierte Gesamtstromproduktion des 850 MW Integrated Wind Programms wird rund 2.380.000 Tonnen CO₂ pro Jahr einsparen, was dem Verbrauch einer Stadt der Größe Casablanca entspricht (ebd.).

Trotz abgeschlossener Projekte zur Entwicklung der Windenergie in Marokko bleiben Herausforderungen bestehen, z. B. hohe Anfangskosten (Nakach et al. 2023). Um die Windturbinen rentabler zu machen, muss ihre Effizienz durch eine Erhöhung der Nabenhöhe verbessert werden (ebd.). Die geografischen und ökologischen Herausforderungen beim Bau von Windprojekten in Marokko können die Kommerzialisierung der Windenergie erschweren (ebd.). Investitionen in die Windenergie in Marokko sind wichtig, um das Potenzial auszuschöpfen und zu einer nachhaltigen Entwicklung beizutragen, insbesondere in der südlichen Region mit dem höchsten Windpotenzial (ebd.).

2.3.3 Wasserkraft

Im marokkanischen Energiemix spielt die Wasserkraft als saubere und erneuerbare Energiequelle eine wichtige Rolle. Marokko verfügt über 26 Wasserkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 1.306 MW (ONEE 2024a). Darunter befindet sich auch der Al-Wahda-Staudamm, der mit einer Kapazität von 460 MW einer der größten Staudämme Afrikas ist (Kousksou et al. 2015b). Zu den anderen Wasserkraftwerken gehören der Mohammed VI-Staudamm am Oum Er-Rbia mit 365 MW installierter Leistung, die Staudämme Al Massira (300 MW), Sidi Moktar (120 MW) und weitere (ebd.).

Im Jahr 2008 hat sich das Land das Ziel gesetzt, bis 2020 durch die Entwicklung einer Reihe von Energie- und Stromerzeugungsprojekten rund 580 MW an Wasserkraft hinzuzufügen (Alnaqbi et al. 2022). Im Jahr 2012 stellten die Vereinten Nationen fest, dass Marokko über ein Potenzial für Mikro- und Mini-Wasserkraftwerke verfügt (ebd.). Die Hauptprobleme, die die Entwicklung kleiner Wasserkraftwerke behindern, sind jedoch die geringen Niederschläge und die geringe Wasserverfügbarkeit in Marokko (ebd.). Das begrenzte Budget für ehrgeizige Energieprojekte hemmt ebenfalls das Wachstum dieser Wasserkraftprojekte (Kousksou et al. 2015b).

Im Jahr 2015 kündigte Marokko auf der COP21 einen weiteren, geplanten Ausbau der erneuerbaren Energien an, um bis 2030 52 % der Gesamtkapazität zu

erreichen (20 % Solar, 20 % Wind, 12 % Wasserkraft) (IEA 2019b). Um das Ziel für 2030 zu erreichen, plant das Land, zwischen 2018 und 2030 rund 10 GW an Kapazitäten für erneuerbare Energien hinzuzufügen, davon 4.560 MW aus Solar-energie, 4.200 MW aus Windkraft und 1.330 MW aus Wasserkraft (ebd.).

Laut Hydropower in Africa zählt das PSW (Pumpspeicherkraftwerk) El Menzel bei Séfrou zu den wichtigsten Energieprojekten auf dem afrikanischen Kontinent (IHA 2024). Es soll Ende 2028 in Betrieb gehen und das nationale Stromnetz um 300 MW erweitern (ebd.). Das Projekt soll den Übergang Marokkos zu sauberer Energie vorantreiben, indem es die Integration erneuerbarer Energien erleichtert, die Netzstabilität erhöht und den Spitzenstrombedarf abdeckt (ebd.). Die Finanzierung erfolgt unter anderem durch die Islamische Entwicklungsbank (ebd.). Ein weiteres zentrales Projekt ist das PSW Abdelmoumen, das eine zusätzliche Leistung von 350 MW in das nationale Netz einspeisen wird (ONEE 2024c). Es ergänzt das bereits seit 2004 in Betrieb befindliche PSW Afourer mit 460 MW und trägt damit zur Stärkung der marokkanischen Speicherinfrastruktur bei (ebd.).

Die neue marokkanische Energiestrategie sieht vor, dass bis 2020 14 % der Energieproduktion des Landes aus Wasserkraft stammen soll (ebd.). Marokkos installierte Kapazität Wasserkraft im Jahr 2023 beträgt 1.771 MW, davon eine installierte Pumpspeicherleistung im Jahr 2023 von 465 MW (ebd.).

2.3.4 Biomasse

Marokko verfügt über ein breites Spektrum an Biomasseressourcen, darunter landwirtschaftliche Abfälle, forstwirtschaftliche Abfälle und Energiepflanzen (Nakach et al. 2023). Das Land besitzt ein beachtliches Biomassepotenzial mit einer Waldfläche von mehr als 5.350.000 ha, dazu Heideflächen von fast 3.300.000 ha, einer landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) von fast 9.000.000 ha und einen stark diversifizierten Viehbestand (Rinder, Schafe, Ziegen etc.) von ca. 7.000.000 Vieheinheiten (Naimi et al. 2017).

Zu den landwirtschaftlichen Abfällen zählen Materialien wie Stroh, Maisstängel und Olivenkerne, während zu den forstwirtschaftlichen Abfällen Sägemehl und Holzspäne gehören (Nakach et al. 2023). Eine der vielversprechendsten Formen dieser Energiequelle in Marokko sind Olivenkerne (ebd.). Das Land ist einer der größten Olivenölproduzenten der Welt, und bei der Herstellung dieses Öls fallen große Mengen an Abfall in Form von Olivenkernen an (ebd.). Diese Kerne können zur

Energiegewinnung durch Verbrennung oder Umwandlung in Biokraftstoffe genutzt werden. Es wird geschätzt, dass dadurch etwa 2.828,11 GWh/Jahr erzeugt werden (ebd.).

Trotz seiner enormen Biomasseressourcen nutzt Marokko derzeit nur weniger als 1 % seiner potenziellen Kapazität, was auf die hohen Investitionskosten und den Mangel an Wissen über Energieerzeugungstechniken und -prozesse zurückzuführen ist (Kousksou et al. 2015b).

Angesichts der weltweiten Entwicklung der energetischen Nutzung von Biomasse wurde das Projekt Nationale Roadmap für die energetische Nutzung von Biomasse auf der Grundlage einer Bestandsaufnahme und Analyse auf nationaler und regionaler Ebene gestartet (MEM 2021b). Dieser Fahrplan, der auf Szenarien für die Entwicklung der energetischen Nutzung von Biomasse im großen Maßstab basiert, stellt das Potenzial für die Sektoren Land- und Forstwirtschaft, Abfall und Abwasser dar und schlägt einen Aktionsplan zur Optimierung der energetischen Verwertung bis 2030 vor (ebd.). Das technische Energiepotenzial beträgt ca. 13,4 Millionen MWh/a (Primärenergie), davon 6,6 Millionen MWh/a aus dem Agrarsektor, 3,5 Millionen MWh/a aus dem Forstsektor, 3,1 Millionen MWh/a aus dem Abfallsektor und 0,2 Millionen MWh/a aus dem Abwassersektor (ebd.). Um die zukünftige Entwicklung des Biomassepotenzials und seiner energetischen Nutzung bis 2030 abzuschätzen, wurden drei Szenarien mit unterschiedlichen Primärenergiepotenzialen aus Biomasse entwickelt (ebd.). Nach diesen Szenarien liegt das Primärenergiepotenzial der Biomasse bis 2030 zwischen 17 TWh/a und 25 TWh/a (ebd.).

2.3.5 Geothermie

Geothermische Energie ist eine Energie, die in Form von Wärme in der Erdkruste vorhanden ist oder von ihr freigesetzt wird und die zur Stromerzeugung und zur Bereitstellung von Direktwärme für eine Vielzahl von Anwendungen genutzt werden kann, wie z. B. Raum- und Fernwärme, Warmwasserbereitung, Aquakultur, Gartenbau und industrielle Prozesse (IEA 2010). Darüber hinaus wird auch die Nutzung von Energie, die mit Hilfe von Erdwärmepumpen aus den konstanten Temperaturen der Erde in geringer Tiefe gewonnen wird, allgemein als Geothermie bezeichnet (ebd.).

Die direkte Nutzung der Geothermie beschränkt sich in Marokko im Wesentlichen auf die Balneologie, Schwimmbäder und die Trinkwassergewinnung (Zarhloule et

al. 2010). Bei der Sanierung von Schwimmbädern wurden in den letzten Jahren einige Fortschritte erzielt und auch die Zahl der neu gebauten Freibäder hat zugenommen (ebd.). Das Produkt ist hauptsächlich für den lokalen Markt bestimmt (ebd.).

Die aktuellen Indikatoren für die Nutzung der Geothermie in Marokko werden wie folgt geschätzt: 5,02 MW als Kapazität und 22 GWh /Jahr als Jahresverbrauch (Baden und Schwimmen) (Kousksou et al. 2015b). Andere Anwendungen wie die Stromerzeugung sind noch nicht entwickelt (ebd.). Dennoch kann Marokko als vielversprechendes Land für die wirtschaftliche Entwicklung der Geothermie angesehen werden (ebd.).

Es wurden neue geothermische Daten vorgestellt, die auf vielversprechende Potenziale im Nordosten Marokkos (Regionen Berkane und Oujda) hinweisen (Rimi et al. 2012). Die beobachteten Temperaturgradienten sind relativ hoch (ebd.). Beispielsweise ergab eine Bohrung in der Nähe von Berkane einen durchschnittlichen geothermischen Gradienten von über 110 °C/km in einer Tiefe von über 300 m (ebd.).

2.4 Plan 2030 - 2050

Marokko hat im letzten Jahrzehnt bemerkenswerte Fortschritte bei der Energie- wende gemacht. Das Land hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2020 20 % seines Energiebedarfs durch erneuerbare Energien zu decken (IEA 2019b). Bis 2030 sollen 52 % der installierten Kapazität aus erneuerbaren Energien stammen, und bis 2050 soll der Anteil erneuerbarer Energien am Energiemix des Landes gemäß der marokkanischen Strategie zur Verringerung des CO₂-Ausstoßes sogar 80 % betragen (Abbildung 6) (IEA 2019b; Benbba et al. 2024).

Das „Marokko-Angebot“ (Offre Maroc), zielt auch darauf ab, Marokko durch einen umfassenden und anreizorientierten Ansatz zum Weltmarktführer in der Produktion von grünem Wasserstoff zu machen (RES4Africa 2024). Das Angebot für grünen Wasserstoff zielt darüber hinaus darauf ab, das Land durch einen umfassenden, anreizgesteuerten Ansatz als weltweit führender Anbieter in der Produktion von grünem Wasserstoff zu etablieren (ebd.). Trotz dieser Fortschritte ist der Weg zu Marokkos Energiezielen nicht frei von Herausforderungen (ebd.).

Wasserknappheit, Ernährungssicherheit und Umweltzerstörung, verstärkt durch den Klimawandel, stellen große Herausforderungen dar (ebd.).

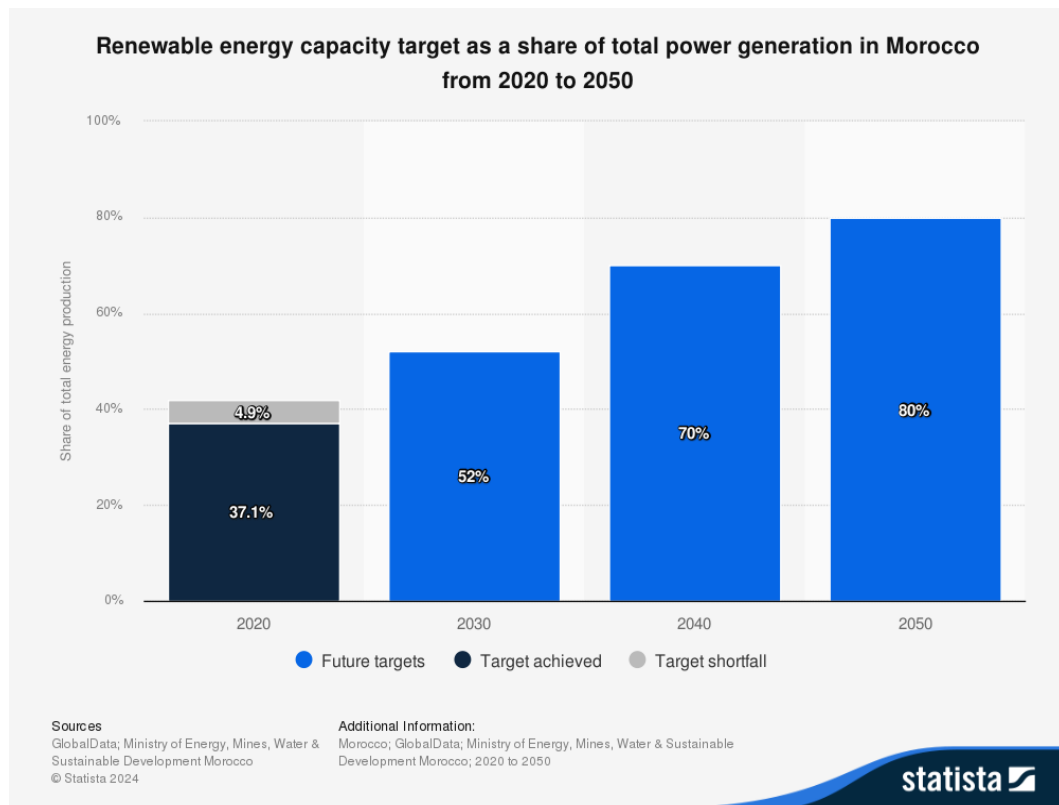


Abbildung 6: Ziel für den Anteil der erneuerbaren Energien an der gesamten Stromerzeugung in Marokko von 2020 bis 2050 (Statista 2025b).

3. Landwirtschaft in Marokko

3.1 Einleitung

Der marokkanische Agrarsektor ist ein fundamentaler Bestandteil der nationalen Ökonomie und spielt eine essenzielle Rolle bei der Förderung des Wirtschaftswachstums, der Schaffung von Arbeitsplätzen sowie der Verbesserung der Lebensbedingungen in den ländlichen Gebieten (Elalaoui et al. 2021; IRES 2024). Die Landwirtschaft trägt substantiell zum Bruttoinlandsprodukt (BIP) bei und ist ein strategischer Sektor für die Beschäftigung und die Entwicklung des ländlichen Raums, was ihre Bedeutung für die sozioökonomische Stabilität des Landes unterstreicht (Rahou und Taqi 2021; IRES 2024). Trotz der bestehenden klimatischen und strukturellen Herausforderungen wird dem Agrarsektor weiterhin eine zentrale Rolle bei der Förderung des Wirtschaftswachstums des Landes zugeschrieben (MEF 2019; Brouziyne 2021). Angesichts seiner Bedeutung für die

Ernährungssicherheit, die Stabilität der ländlichen Bevölkerung sowie die Armutsbekämpfung ist die Entwicklung dieses Sektors von entscheidender Bedeutung für die Zukunft Marokkos (Zitan und Chafik 2021).

Diese Bedeutung wird durch seinen erheblichen Anteil am Bruttoinlandsprodukt von bis zu 12,3 % unterstrichen, was ihn zu einem der wichtigsten Wirtschaftssektoren des Landes macht (MEF 2019; IRES 2024). Darüber hinaus ist der Agrarsektor der größte Arbeitgeber im ländlichen Raum und trägt maßgeblich zur Ernährungssicherheit des Landes bei (MEF 2019). Allerdings steht der Sektor vor großen Herausforderungen, hauptsächlich im Bereich der Wasserressourcen, da er fast 85 % der erneuerbaren Wasserressourcen des Landes verbraucht, während gleichzeitig eine zunehmende Wasserknappheit droht, die in nur zwei Jahrzehnten überwunden werden soll (Elouadi et al. 2020; Hssaisoune et al. 2020; IRES 2024).

In Marokko ist die Landwirtschaft ein Schlüsselsektor, der zwar mit etwa 12 % zum Bruttoinlandsprodukt beiträgt, aber einen beträchtlichen Teil der Arbeitsplätze des Landes sichert (MEF 2019). Die Landwirtschaft beschäftigt fast 40 % der gesamten Erwerbstätigen Marokkos und ist damit ein wichtiger Arbeitgeber, vor allem in ländlichen Gebieten, wo etwa 75 % der Bevölkerung in diesem Sektor tätig sind (Harbouze et al. 2019; MEF 2019). Trotz der Schwankungen des Beitrags zum BIP, der im Jahr 2022 bei 10,33 % sowie im Jahr 2023 bei 11,96 % lag, bleibt die Landwirtschaft ein entscheidender Sektor (Abbildung 7) (Harbouze et al. 2019; Statista 2024a). Diese Variabilität ist vor allem auf klimatische Bedingungen und insbesondere auf die Niederschläge zurückzuführen, was die Anfälligkeit des Sektors für Umwelteinflüsse unterstreicht (Harbouze et al. 2019; Weltbank 2023). Die landwirtschaftliche Aktivität ist regional unterschiedlich stark ausgeprägt und leistet in einigen Regionen einen wichtigen Beitrag zur lokalen Wirtschaft (MEF 2019). Die Anfälligkeit des Sektors für Klimarisiken hat zu erheblichen Schwankungen sowohl des Beitrags zum BIP als auch des BIP insgesamt geführt (Ejjar und Arib 2022). Darüber hinaus ist die Landwirtschaft ein wesentlicher Bestandteil der marokkanischen Exportwirtschaft und trägt bis zu 10,5 % zu den Gesamtexporten bei und sichert bis zu 65 % des Einkommens der ländlichen Bevölkerung (FAO 2023). Allerdings dominiert die Landwirtschaft nach wie vor die ländlichen Regionen, da der

Anteil der nicht-landwirtschaftlichen Beschäftigung relativ gering ist (Harbouze et al. 2019; FAO 2023).

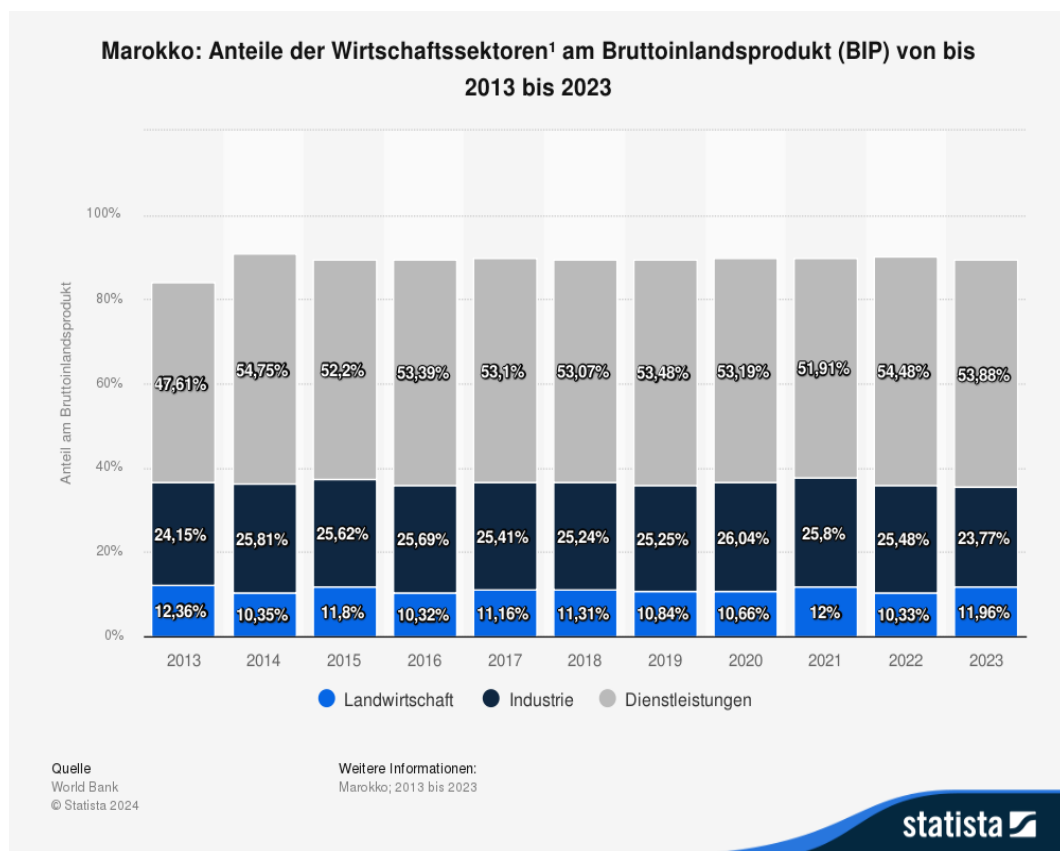


Abbildung 7: Anteile der Wirtschaftssektoren Marokkos am Bruttoinlandsprodukt (BIP) von 2013 bis 2023 (Statista 2024a).

Jüngsten Schätzungen zufolge beläuft sich die landwirtschaftlich genutzte Fläche in Marokko auf rund 30 Millionen Hektar, was einem großen Teil der Gesamtfläche des Landes entspricht (MAPMDREF 2019; Harbouze et al. 2019). Innerhalb dieser ausgedehnten Agrarregion werden die Ackerflächen, die sowohl einjährige als auch Dauerkulturen umfassen, im Jahr 2022 schätzungsweise 8,7 Millionen Hektar einnehmen, was etwa 12,25 % der Gesamtfläche des Landes entspricht (MAPMDREF 2019; Harbouze et al. 2019). Diese Zahl unterstreicht die Bedeutung der Landwirtschaft für die marokkanische Wirtschaft und die Ernährungssicherheit (MAPMDREF 2019). Der Getreideanbau dominiert die Ackerflächen und beansprucht etwa 59 % der gesamten Anbaufläche (MAPMDREF 2019; Agrimaroc 2024). Der Obstanbau folgt mit einem Anteil von 16 %, was die Bedeutung des Obstanbaus für die marokkanische Landwirtschaft widerspiegelt (ebd.). Die Produktion von Futtermitteln nimmt 5 % der Ackerfläche ein, während der Anbau von Hülsenfrüchten sowie Gemüse jeweils 3 % ausmacht (Harbouze et al. 2019;

MAPMDREF 2019). Bemerkenswert ist, dass nur 12 % der Ackerfläche als Brachland ausgewiesen sind, was auf eine relativ intensive Nutzung der verfügbaren landwirtschaftlichen Ressourcen hindeutet (Harbouze et al. 2019). Diese Daten unterstreichen die Diversifizierung der marokkanischen Landwirtschaft, obwohl Getreide den größten Anteil einnimmt. Die Wälder Marokkos bedecken eine Fläche von etwa 9 Millionen Hektar und tragen wesentlich zur ökologischen Vielfalt und zum wirtschaftlichen Potenzial des Landes bei (MAPMDREF 2019).

Die Landwirtschaft spielt in Marokko eine entscheidende Rolle, wobei der Anbau von Weizen, Gerste, Zuckerrüben sowie große Mengen an Kartoffeln, Oliven, Tomaten und Zitrusfrüchten von großer Bedeutung sind (Harbouze et al. 2019). Tomaten weisen im Vergleich zu anderen Feldfrüchten den höchsten Ertrag pro Hektar auf, was sie zu einer effizienten Kultur in Bezug auf die Landnutzung macht (RES4Africa 2023a). Neben diesen Hauptkulturen werden auch Zwiebeln, Melonen, Wassermelonen, Karotten, Rüben, Paprika, Minze, Zucchini und Erbsen angebaut, die zur Diversifizierung des Agrarsektors beitragen (MEF 2019).

Die marokkanische Landwirtschaft ist durch eine ausgeprägte Dichotomie zwischen traditioneller Subsistenzproduktion und zunehmend marktorientierter Produktion gekennzeichnet (Skees et al. 2001; MAPMDREF 2019). Diese Dualität prägt die Struktur und die wirtschaftliche Dynamik des Sektors, in dem unterschiedliche landwirtschaftliche Praktiken und sozioökonomische Bedingungen vorherrschen (Skees et al. 2001). Die traditionelle Subsistenzwirtschaft konzentriert sich vor allem auf kleinbäuerliche Betriebe in niederschlagsreichen Gebieten, in denen der Anbau von Getreide und Hülsenfrüchten sowie die Viehzucht im Vordergrund stehen (Harbouze et al. 2019). Diese Betriebe sind stark von den natürlichen Niederschlägen abhängig, was sie anfällig für Klimaschwankungen sowie Dürren macht (Lahlou 2016). Die ländliche Bevölkerung, die einen großen Teil der marokkanischen Bevölkerung ausmacht, besteht hauptsächlich aus Subsistenzbauern, deren Produktion stark von den Niederschlägen abhängt (ebd.). Die Anfälligkeit gegenüber Niederschlagsdefiziten verdeutlicht den Bedarf an widerstandsfähigeren Anbaumethoden und Bewässerungstechnologien, um die Stabilität der landwirtschaftlichen Produktion in diesen Regionen zu gewährleisten (Treguer et al. 2018; Elouadi et al. 2020). Die starke Abhängigkeit von den jährlichen Niederschlägen hat erhebliche Auswirkungen auf das jährliche Bruttoagrарprodukt, was die Bedeutung des Agrarsektors für die marokkanische Wirtschaft unterstreicht (Elouadi et al. 2020). Jedes Niederschlagsdefizit hat weitreichende Folgen

für die gesamte Wirtschaft des Landes, da es sich direkt auf die Ernteerträge, das Einkommen der Landwirte und die allgemeine Ernährungssicherheit auswirkt (ebd.).

Die Bewässerungslandwirtschaft spielt eine entscheidende Rolle für die marokkanische Wirtschaft und die Agrarexporte (MEF 2019; Ed-daoudi et al. 2023). Obwohl sie nur 15 % der gesamten LN des Landes einnimmt, trägt sie mit rund 45 % wesentlich zur landwirtschaftlichen Produktion bei und erwirtschaftet sogar 75 % der Agrarexporte (ebd.).

3.2 Geografische und klimatische Bedingungen

Marokko, als ein geographisch, klimatisch und ökologisch einzigartiges Land im Mittelmeerraum, zeichnet sich durch eine bemerkenswerte Biodiversität aus (Assam et al. 2021). Die Landwirtschaft in Marokko steht vor großen Herausforderungen durch den Klimawandel, da das Land als ein Hotspot für die Auswirkungen des Klimawandels im Mittelmeerraum gilt (Harbouze et al. 2019). Die marokkanische Landwirtschaft ist stark von den natürlichen Ressourcen des Landes abhängig, insbesondere von Wasser, Boden und Biodiversität (Epule Epule et al. 2023). Der Großteil des Landes, etwa 93 %, liegt in ariden und wüstenähnlichen Gebieten, was zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Wasserressourcen führt (Hssaisoune et al. 2020; Hachem et al. 2023).

Marokko präsentiert sich als ein Land mit einer bemerkenswerten, topographischen Vielfalt, die von den erhabenen Gipfeln des Atlasgebirges über weite Hochebenen und fruchtbare Ebenen bis hin zu den ruhigen Oasen und majestätischen Dünen der Sahara reicht (Hssaisoune et al. 2020). Diese topographische Vielfalt spiegelt sich in einer ebenso vielfältigen Klimatologie wider, die durch signifikante räumliche Variationen in den Niederschlagsmustern sowohl im Jahresverlauf als auch zwischen den Jahren gekennzeichnet ist (Epule Epule et al. 2023).

Die Niederschläge nehmen generell von Norden nach Süden und von Westen nach Osten ab (Harbouze et al. 2019). Marokko ist mit unregelmäßigen Niederschlägen, Kälteperioden und Hitzewellen konfrontiert, die zunehmend zu Dürren führen und die Landwirtschaft des Landes erheblich beeinträchtigen (ebd.).

Das Klima Marokkos wird im Wesentlichen von zwei Hauptklimazonen bestimmt: dem mediterranen Klima in den nördlichen Küstenregionen und dem Saharaklima im südlichen und südöstlichen Hinterland (Msanda et al. 2002). Das Atlasgebirge,

das sich wie ein Rückgrat durch die Mitte des Landes zieht, fungiert als natürliche Barriere und trennt somit diese beiden Klimazonen voneinander (Ouraich 2014). Die nördliche, dem Mittelmeer zugewandte Küstenlinie (die sich über 512 km von Saidia im Osten bis zum Kap Spartel im Westen erstreckt) und die westliche, dem Atlantik zugewandte Küstenlinie spielen eine entscheidende Rolle bei der Milderung der Temperaturschwankungen zwischen den Jahreszeiten (ebd.). Die Küstenebenen im Norden sind mit reichlichen Niederschlägen gesegnet, während die Bergregionen in den Wintermonaten mit Schnee bedeckt sind (ebd.).

In den Sommermonaten Juli, August und September liegen die Temperaturen zwischen 22 und 25 °C, während die Temperaturen im Januar, Februar und März zwischen 10 und 12 °C liegen (ebd.). Von den Küstenebenen im Westen nach Osten wird das Klima kontinentaler mit kühleren Temperaturen in höheren Lagen (ebd.). Im Landesinneren Marokkos herrschen deutliche jahreszeitliche Temperaturschwankungen (ebd.).

Die Auswirkungen des Klimawandels sind beispiellos und die biologischen Reaktionen darauf auf Ebene von Ökosystemen, Lebensgemeinschaften und Arten erfolgen schnell (Assem et al. 2021). Die Schneebedeckung im Atlasgebirge unterliegt starken jährlichen und zwischenjährlichen Klimaschwankungen unterworfen (Hssaisoune et al. 2020). Das Atlasgebirge gilt als wichtiger Wasserspeicher (Wasserturm) für die Bevölkerung und die Landwirtschaft in den tiefer gelegenen Gebieten Marokkos (Hughes et al. 2020; Marchane et al. 2021). Die Schneeschmelze speist die Flüsse und Grundwasserreserven, die für die Bewässerung und Wasserversorgung von großer Bedeutung sind (ebd.). Klimaänderungen, die zu verringerten Schneemengen und früheren Schmelzperioden führen, haben daher erhebliche Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit (ebd.). Diese Schwankungen haben sich in den letzten Jahrzehnten durch den Klimawandel verstärkt und beeinflussen die hydrologischen Prozesse in den Einzugsgebieten des Atlasgebirges (Algarra et al. 2019).

Das Klima im Souss-Massa-Gebiet wird durch die Topographie, die Küste und die Sahara geprägt (Hssaisoune et al. 2020). Die jährliche Niederschlagsmenge variiert stark, mit einem Durchschnitt von 200 bis 300 mm an der Küste und weniger als 200 mm im Landesinneren (ebd.). Das Gebiet wird von den Flüssen Souss, Massa und Drâa begrenzt, die aus dem Hohen Atlas und dem Anti-Atlas gespeist werden (ebd.). Die Klimamodelle des UN-Weltklimarats sagen für die nächsten

Jahrzehnte einen deutlichen Rückgang der Niederschläge in den nördlichen und zentralen Teilen Marokkos voraus (Filahi et al. 2017; Hssaisoune et al. 2020).

Die Prognosen deuten darauf hin, dass Marokko in den kommenden Jahrzehnten aufgrund steigender Temperaturen und abnehmender Niederschläge zunehmend unter Trockenheit leiden wird (Harbouze et al. 2019). Landwirtschaftlich genutzte Gebiete, vor allem solche, die auf Regen angewiesen sind, werden am stärksten von dem erwarteten Rückgang der Niederschläge, den steigenden Temperaturen und den daraus resultierenden Erosionseffekten betroffen sein (ebd.). Die daraus resultierende Verknappung von Oberflächen- und Grundwasser wird sich direkt auf die Rentabilität der Landwirtschaft auswirken (ebd.).

3.3 Bedeutung der Landwirtschaft für Marokko

Der Agrarsektor nimmt eine Schlüsselposition in der marokkanischen Wirtschaft und Gesellschaft ein, da er eine beträchtliche Anzahl an Arbeitsplätzen schafft und einen bedeutenden Anteil an den Exporten des Landes ausmacht (MAPMDREF 2019). Fast die Hälfte der marokkanischen Erwerbsbevölkerung ist in der Landwirtschaft beschäftigt, was die soziale Bedeutung des Sektors unterstreicht, während etwa 20 % der marokkanischen Exporte auf Agrarprodukte entfallen (El Mekkaoui et al. 2021). In ländlichen Gebieten, in denen die Landwirtschaft häufig das Rückgrat der lokalen Wirtschaft bildet, kann ihr Anteil am Gesamteinkommen bis zu 75 % betragen (MAPMDREF 2019). Neben ihrer wirtschaftlichen Bedeutung spielt die Landwirtschaft eine entscheidende Rolle bei der Ernährungssicherung der marokkanischen Bevölkerung, indem sie einen Großteil des Bedarfs an Grundnahrungsmitteln wie Gemüse, Obst, Milchprodukten und Fleisch deckt (MEF 2019). Dies gilt insbesondere für die kleinbäuerliche Landwirtschaft, die den Großteil der marokkanischen Landwirtschaft ausmacht und damit einen wichtigen Beitrag zur Ernährungssicherheit des Landes leistet (ebd.).

Marokko hat sich durch die Dynamik seines Exportsektors zu einem wichtigen Akteur auf dem Weltmarkt für Agrarprodukte entwickelt (MEF 2019; EastFruit 2023a). Der Agrarsektor ist der größte Arbeitgeber in Marokko mit einem Anteil von rund 38 % an der Gesamtbeschäftigung (MEF 2019). Er trägt auch maßgeblich zur wirtschaftlichen Entwicklung des Landes bei (Harbouze et al. 2019). Die Entwicklung des marokkanischen Agrarsektors hat ein enormes Potenzial, neue Beschäftigungsmöglichkeiten zu schaffen und die sozioökonomische Entwicklung in ländlichen Gebieten zu fördern (ebd.). Der enge Zusammenhang zwischen dem

Wachstum in Marokko und dem Agrarsektor zeigt sich in den starken Schwankungen der Wertschöpfung dieses Sektors, die wiederum von den klimatischen Bedingungen, vor allem den Niederschlägen, abhängen und direkte Auswirkungen auf das Bruttoinlandsprodukt haben (ebd.). Die marokkanische Wirtschaft erlebt seit Beginn der 2000er Jahre einen tiefgreifenden Strukturwandel, der sich hauptsächlich in der Stärkung des tertiären Sektors widerspiegelt (ebd.).

Obwohl der Anteil der Landwirtschaft an der Gesamtbeschäftigung rückläufig ist, blieb die absolute Zahl der Beschäftigten in der Landwirtschaft im Zeitraum 2000-2017 mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von -0,38 % relativ stabil (ebd.). Während Marokko eine relative Stabilität der Beschäftigung in der Landwirtschaft verzeichnet, haben andere vergleichbare Länder wie Ägypten, die Türkei und Mexiko im selben Zeitraum eine relative Verbesserung der Beschäftigung in diesem Sektor mit durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten von 1,2%, 1,3% bzw. 1,9% verzeichnet (ebd.).

Marokko hat nicht nur seine landwirtschaftliche Produktion gesteigert, sondern auch einen diversifizierten und wettbewerbsfähigen Agrar- und Ernährungssektor entwickelt, hauptsächlich in den Bereichen Getreideverarbeitung, Milch- und Milchproduktindustrie sowie Obst- und Gemüseverarbeitung (ebd.). Trotz des Rückgangs des Anteils der Landwirtschaft an der sektoralen Zusammensetzung ist die marokkanische Landwirtschaft nach wie vor vielfältigen Zwängen unterworfen, insbesondere der klimabedingten Volatilität, die nach wie vor die Wirtschaftsleistung des Landes insgesamt beeinflusst (Elalaoui et al. 2021)

Die Landwirtschaft trägt rund 12 % zum Bruttoinlandsprodukt des Königreichs Marokko bei (MEF 2019). Sie beschäftigt fast 40 % der Erwerbstätigen Bevölkerung auf nationaler Ebene und 75 % in ländlichen Gebieten, in denen immer noch fast 40 % der Bevölkerung leben (siehe Kapitel 3.1). Die kleinbäuerliche Landwirtschaft, die den Großteil der marokkanischen Landwirtschaft ausmacht, ist und bleibt der Schlüssel zur Ernährungssicherheit des Landes (ebd.). Dank der Dynamik des Exportsektors für landwirtschaftliche Produkte ist Marokko zu einem der weltweit führenden Exporteure von Agrarprodukten geworden (Abbildung 8) (Harbouze et al. 2019). Das Wachstum Marokkos ist eng mit dem Agrarsektor verknüpft: Die starken Schwankungen der Wertschöpfung in diesem Sektor, die seine Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen und insbesondere von den Niederschlägen verdeutlichen, wirken sich direkt auf das BIP-Wachstum aus (ebd.). Über die landwirtschaftliche Produktion hinaus hat Marokko einen diversifizierten

und wettbewerbsfähigen Agrar- und Ernährungssektor entwickelt, vor allem in der Getreideverarbeitung, der Milch- und Milchproduktindustrie sowie der Obst- und Gemüseverarbeitung (Elalaoui et al. 2021).

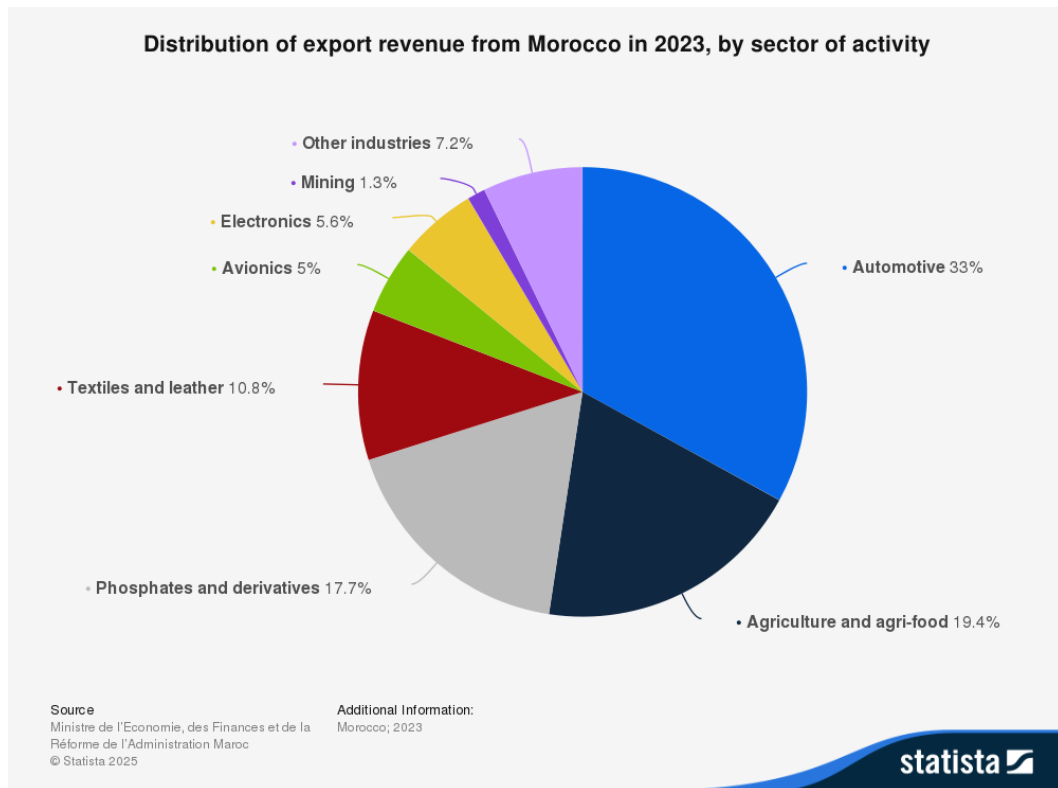


Abbildung 8: Verteilung der Exporterlöse Marokkos nach Wirtschaftszweigen im Jahr 2023 (Statista 2025c).

Marokko hat sich als bedeutender Akteur in der globalen Landwirtschaft etabliert, insbesondere als einer der führenden Düngemittelproduzenten und als drittgrößter Exporteur von Obst und Gemüse in der Middle East North Africa (MENA)-Region (Harbouze et al. 2019). Darüber hinaus steht das Land an vierter Stelle in Afrika, was seine wachsende Bedeutung im Agrar- und Ernährungssektor unterstreicht (Amachraa 2023). Die Landwirtschaft trägt bis zu 12,3 % zum Bruttoinlandsprodukt Marokkos bei und beschäftigt direkt und indirekt rund 2.960.000 Menschen, was die sozioökonomische Bedeutung dieses Sektors verdeutlicht (MEF 2019). Die Zahl der Menschen, deren Lebensunterhalt direkt oder indirekt von der Landwirtschaft abhängt, wird auf über 10 Millionen geschätzt, was die Rolle des Sektors als wichtiger Arbeitgeber und Einkommensquelle im Land unterstreicht (Amachraa 2023). Marokko verfügt mit 30,4 Millionen Hektar fruchtbaren Bodens und 1,6 Millionen Landwirten über ein beachtliches landwirtschaftliches Kapital, das eine solide Grundlage für die Produktion von Zitrusfrüchten, Tomaten, Oliven, Zucker, Datteln und Argan bildet (El Mekkaoui et al. 2021). Dies stellt ein erhebliches

Kapital für die Entwicklung einer Agrar- und Ernährungswirtschaft dar, die 4% des BIP, 161.000 Arbeitsplätze und 2.100 Unternehmen mit einer Verarbeitungskapazität von ca. 45 Millionen Tonnen ausmacht und einen Exportwert von 3,9 Milliarden Marokkanische Dirham (MAD) generiert (MEF 2019). Trotz dieses Potenzials ist die landwirtschaftliche Produktion instabil und ihr Beitrag zum BIP schwankt stark je nach Anbausaison und klimatischen Bedingungen (Brouziyne 2021). Die marokkanische Landwirtschaft ist also ein wichtiger Wirtschaftszweig mit viel Potenzial, aber auch mit einigen Herausforderungen.

3.4 Wasserressourcen

Die zunehmende Häufigkeit und Ausdehnung von Dürren in Marokko in den letzten Jahrzehnten hat zu einer kritischen Wassersituation geführt, die durch einen beispiellosen Rückgang der konventionellen Wasserressourcen gekennzeichnet ist (IRES 2024). Die dramatische Abnahme der Wasserverfügbarkeit betrifft sowohl das Oberflächenwasser, das durch Staudämme bereitgestellt wird, als auch das Grundwasser, das in vielen Regionen zur Hauptquelle für die Bewässerung geworden ist (Elouadi et al. 2020). Neben dem Klimawandel haben auch politische Entscheidungen zu dieser Entwicklung beigetragen, was die Notwendigkeit einer umfassenden Analyse der Ursachen und Auswirkungen von Wasserknappheit unterstreicht (ebd.).

Marokko gehört zu den Ländern mit der größten Wasserknappheit, wobei die Wasserversorgung von knapp 620 m³ pro Kopf und Jahr bereits jetzt eine strukturelle Wasserknappheit darstellt (Weltbank 2023). Die demographische Entwicklung, die steigende Nachfrage aus verschiedenen Wirtschaftssektoren und die negativen Folgen des Klimawandels könnten diese Zuteilung bis 2050 auf unter 500 m³ pro Person und Jahr senken, was einer absoluten Knappheit entsprechen würde (Abbildung 9) (ebd.).

Darüber hinaus ist Marokko mit immer häufigeren, intensiveren und länger anhaltenden Dürren konfrontiert, die die Verwundbarkeit ländlicher Gebiete erhöhen und sich negativ auf die makroökonomische Stabilität und die nationale Ernährungssicherheit auswirken (ebd.). Daher ist es wichtig, die komplexen Zusammenhänge zwischen Klimawandel, Wassermanagement und sozioökonomischer Entwicklung zu verstehen, um effektive Strategien zur Bewältigung der Wasserknappheit zu entwickeln (Harbouze et al. 2019).

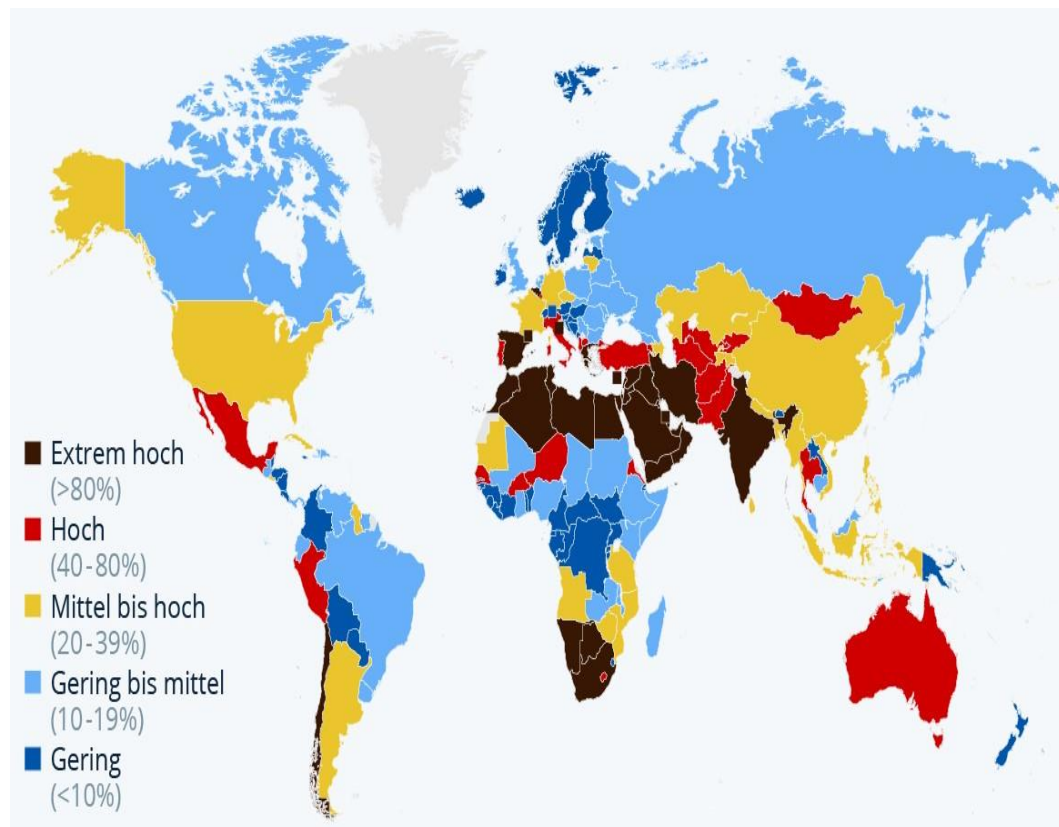


Abbildung 9: Geschätzter Anteil der menschlichen Wassernutzung an der Wasserverfügbarkeit (Wasserstress) im Jahr 2050 (Statista 2024).

Die zunehmende Wasserknappheit in Marokko wird durch eine Kombination aus klimatischen Faktoren und menschlichem Handeln verschärft, wobei die ungleiche Verteilung der Wasserressourcen und die ineffiziente Wassernutzung zusätzliche Probleme darstellen (Harbouze et al. 2019). Es wird erwartet, dass der Klimawandel die Wasserverfügbarkeit weiter reduziert, während die Nachfrage aufgrund des Bevölkerungswachstums und der wirtschaftlichen Entwicklung steigt (ebd.). Prognosen gehen davon aus, dass Marokko in den kommenden Jahrzehnten aufgrund steigender Temperaturen und abnehmender Niederschläge zunehmend von Dürren betroffen sein wird (ebd.). Die landwirtschaftliche Produktion, die einen großen Teil des marokkanischen BIP ausmacht, ist besonders anfällig für Wasserknappheit, da die Bewässerung einen großen Teil des gesamten Wasserverbrauchs ausmacht (ebd.).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserressourcen werden immer deutlicher, da die Durchschnittstemperatur bis 2030 um 1,1 bis 1,6 °C, bis 2050 um 1,5 bis 2,7 °C und bis 2080 um 2,2 bis 5,1 °C steigen könnte (ebd.). Gleichzeitig könnten die Niederschläge bis 2030 um 14 %, bis 2050 um 13 bis 30 % und bis 2080 um 21 bis 36 % sinken (ebd.). Dies wird die Verwundbarkeit ländlicher

Regionen erhöhen und sich negativ auf die makroökonomische Stabilität und die nationale Ernährungssicherheit auswirken (ebd.).

Der Agrarsektor, der aufgrund seiner herausragenden Stellung bei der Nutzung von Wasserressourcen am stärksten von den erwarteten Niederschlagsrückgängen betroffen sein wird, sowohl für den Regenfeldbau als auch für den Bewässerungsfeldbau, wird auch von den erwarteten Temperaturanstiegen und den Auswirkungen auf die Bodenerosion betroffen sein (ebd.). Um die Widerstandsfähigkeit des Agrarsektors gegenüber dem Klimawandel zu verbessern, hat Marokko Maßnahmen zur Förderung von Wassereinsparung und -verbesserung in der Bewässerungslandwirtschaft ergriffen (ebd.). Es ist von entscheidender Bedeutung, dass politische Entscheidungsträger und Interessenvertreter zusammenarbeiten, um innovative Lösungen zu entwickeln, die eine nachhaltige Wassernutzung gewährleisten und gleichzeitig die wirtschaftliche Entwicklung fördern (Et-Touile 2023).

Marokko hat sich verpflichtet, seine Treibhausgasemissionen bis 2030 deutlich zu reduzieren, was Investitionen in erneuerbare Energien und Energieeffizienzmaßnahmen erfordert (Et-Touile 2023). Darüber hinaus hat Marokko eine nationale Strategie für nachhaltige Entwicklung verabschiedet, die darauf abzielt, die wirtschaftliche Entwicklung mit Umweltschutz und sozialer Gerechtigkeit in Einklang zu bringen (ebd.). Angesichts der zunehmenden Wasserknappheit hat Marokko verschiedene Maßnahmen ergriffen, um die Wassereffizienz zu verbessern und alternative Wasserquellen zu erschließen (Elouadi et al. 2020). Dazu gehören Investitionen in die Meerwasserentsalzung, die Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser und die Förderung von wassersparenden Bewässerungstechniken (ebd.). Wichtig ist auch, die Rolle der Bodenerosion bei der Verschärfung der Wasserknappheit zu berücksichtigen (Maher et al. 2020). Die marokkanische Regierung hat auch die Bedeutung eines integrierten Wasserressourcenmanagements erkannt, um eine nachhaltige Nutzung der Wasserressourcen zu gewährleisten (Achraf et al. 2021).

Marokko steht im Bereich der Wasserressourcen vor großen Herausforderungen, die durch den Klimawandel noch verschärft werden. Die Wasserressourcen des Landes werden auf insgesamt 22 Milliarden m³ geschätzt, davon 18 Milliarden m³ Oberflächenwasser, das je nach Jahr zwischen 3 und 48 Milliarden m³ schwankt, und 4 Milliarden m³ Grundwasser (Harbouze et al. 2019; MEE 2022). Der marokkanische Wassersektor ist durch steigende finanzielle und ökologische Kosten für

die Bereitstellung von mehr Wasser, Konflikte zwischen verschiedenen Wassernutzern und das Auftreten negativer externer Effekte gekennzeichnet (Et-Touile 2023). Die zunehmende Wasserknappheit in Marokko ist vor allem auf den Klimawandel zurückzuführen, der sich durch steigende Temperaturen und unregelmäßige Niederschläge bemerkbar macht (Harbouze et al. 2019). Die zunehmende Trockenheit hat die Verfügbarkeit von Oberflächenwasser verringert, da sich etwa 70 % der marokkanischen Wasserquellen auf 15 % der Landesfläche konzentrieren, insbesondere in den Flussbecken im Norden des Landes (Bennouna 2020).

In den letzten 40 Jahren ist der durchschnittliche Jahresniederschlag in Marokko um 33 % zurückgegangen, was sich negativ auf die Grundwasserneubildung und die Wasserstände der Oberflächengewässer auswirkt (Ahmed et al. 2021; Weltbank 2023). Es wird erwartet, dass sich die Erwärmung und Austrocknung in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts noch verstärken wird (Ahmed et al. 2021; Weltbank 2023).

Eine Studie der Weltbank zeigt jedoch, dass die Wasserressourcen Marokkos (Oberflächenwasser) seit 1979 rückläufig sind: Von durchschnittlich 22 Milliarden m³ pro Jahr zwischen 1945 und 1978 (gelbe Linie) auf durchschnittlich 15 Milliarden m³ pro Jahr zwischen 1979 und 2018 (dunkelblaue Linie) (Abbildung 10). Die Wahrscheinlichkeit, dass ein jährlicher Zufluss von 15 Milliarden m³ zwischen 1945 und 1978 auftrat, betrug 80%. Zwischen 1979 und 2018 sank diese Wahrscheinlichkeit auf nur noch 50% (Weltbank 2023).

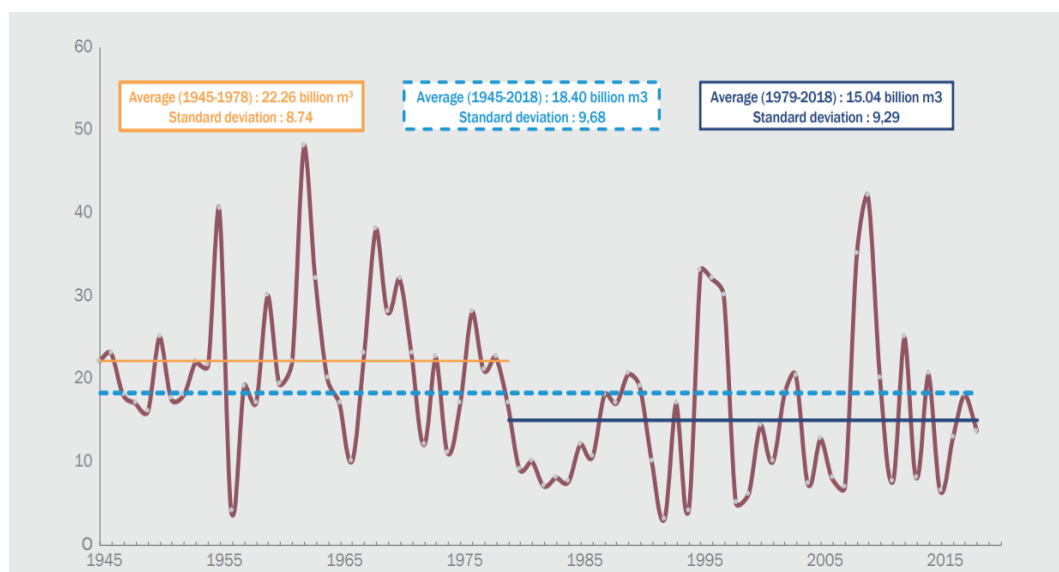


Abbildung 10: Wasserzuflüsse Marokkos (in Milliarden m³/Jahr) (Weltbank 2023).

Marokko steht vor erheblichen Herausforderungen im Bereich der Wasserressourcen, da fast die Hälfte der erneuerbaren Wasserressourcen des Landes entnommen wird, was einer jährlichen Gesamtentnahme von etwa 12 Milliarden m³ Oberflächen- und Grundwasser entspricht (Hssaisoune et al. 2020). Dabei entfallen beachtliche 87,3 % der gesamten Wasserentnahme auf die Landwirtschaft, was die zentrale Rolle dieses Sektors für den Wasserverbrauch unterstreicht (Darwesh et al. 2020). Die Abhängigkeit von Staudämmen zur Deckung des landwirtschaftlichen Wasserbedarfs ist mit 85 % hoch, jedoch übersteigt der Wasserbedarf in Marokko das verfügbare Angebot um etwa 3 Milliarden m³, was die angespannte Situation verdeutlicht (Achraf et al. 2021). Das Wasserangebot wird auf 12,9 Milliarden m³ geschätzt, während der Wasserbedarf bei 19,9 Milliarden m³ liegt, was zu einer erheblichen Diskrepanz führt (ebd.). Um der zunehmenden Wasserknappheit zu begegnen, hat die marokkanische Regierung dem integrierten Wasserressourcenmanagement Priorität eingeräumt, um eine sozial und technisch effiziente Verteilung der verfügbaren Ressourcen zwischen den verschiedenen Sektoren zu erreichen (Molle und Tanouti 2017).

Die Nutzung der Grundwasserressourcen hat in Marokko stark zugenommen, hauptsächlich als Reaktion auf die Dürreperiode Ende der 1970er Jahre (Hssaisoune et al. 2020). Die Landwirtschaft nutzt 80 bis 95 % der Wasserressourcen, von denen mindestens 40 % aus Grundwasser stammen (ebd.). In den südlichen Einzugsgebieten liegt dieser Anteil sogar bei über 70 %, was die regionale Abhängigkeit vom Grundwasser unterstreicht (ebd.). In Dürrejahren kann sich dieser Anteil jedoch noch deutlich steigern (Elouadi et al. 2020). Trotz der wichtigen Rolle des Grundwassers bestehen erhebliche Datenlücken hinsichtlich seiner Qualität und Quantität, was eine fundierte Bewertung der langfristigen Auswirkungen der Grundwasserübernutzung erschwert (Weltbank 2023). Die zunehmende Entnahme von Grundwasser für die städtische und ländliche Entwicklung sowie die abnehmende Neubildung durch Niederschläge aufgrund des Klimawandels werden die Grundwasserressourcen in Marokko voraussichtlich weiter reduzieren (Hssaisoune et al. 2020). Derzeit werden jährlich ca. 3,17 Milliarden m³ Grundwasser entnommen, die tatsächliche Entnahme liegt bei ca. 4,2 Milliarden m³ pro Jahr (Epule Epule et al. 2023). Maßnahmen zur Rationierung der Grundwassernutzung, zur Verbesserung der Effizienz der Bewässerung und zur Erhebung von Gebühren für die Grundwasserentnahme sind für eine nachhaltige Bewirtschaftung unerlässlich (ebd.).

3.5 Bewässerung

Bewässerung ist eine zentrale Komponente der modernen Landwirtschaft und spielt eine entscheidende Rolle bei der Steigerung der Ernteerträge, insbesondere in Regionen mit unzureichenden oder unregelmäßigen Niederschlägen (Epule Epule et al. 2023). In Marokko, wo Wasserknappheit ein drängendes Problem darstellt, ist die Bewässerung von großer Bedeutung für die wirtschaftliche und soziale Stabilität, da sie eine der wichtigsten Quellen für die landwirtschaftliche Produktion und das Einkommen der ländlichen Bevölkerung darstellt (Et-Touile 2023).

Die Bewässerung in der Landwirtschaft ist eine künstliche Technik, die auf Agrarflächen angewendet wird, um die Erträge zu erhöhen, hauptsächlich wenn Regenwasser fehlt oder unzureichend ist (ebd.). Die Bewässerung ermöglicht es, die Erträge landwirtschaftlicher Nutzflächen zu optimieren, erfordert jedoch den Einsatz großer Wassermengen, um das für ein starkes Wachstum erforderliche Wasser bereitzustellen (ebd.). Die landwirtschaftliche Bewässerung wird auch für Nutzpflanzen wie Mais oder Baumwolle eingesetzt, die einen höheren Wasserbedarf haben, als lokal verfügbar ist (Agrimaroc 2021).

Trotz der Tatsache, dass nur ein kleiner Teil der LN des Königreichs bewässert wird, trägt die Bewässerung erheblich zum landwirtschaftlichen Bruttoinlandsprodukt und zu den Exporten des Sektors bei (Epule Epule et al. 2023). Die zunehmende Wasserknappheit aufgrund des Klimawandels stellt die Landwirte jedoch vor immer größere Herausforderungen (ebd.). Um die Bewässerung nachhaltiger zu gestalten, hat die marokkanische Regierung einen nationalen Plan zur Optimierung der Wassernutzung und zur Steigerung der landwirtschaftlichen Produktivität eingeführt (ebd.). Dieser Plan zielt darauf ab, für die Landwirtschaft den Zugang zu Bewässerungswasser zu erleichtern und andere landwirtschaftliche Betriebsmittel wie Düngemittel bereitzustellen (ebd.).

Die Herausforderungen im Zusammenhang mit der Bewässerung in Marokko sind jedoch vielfältig und komplex. Neben Wasserknappheit, unvorhersehbaren Wetterbedingungen zählt mangelnder Zugang zu Informationen und Ressourcen zu den Herausforderungen (ebd.). Marokko gehört zu den Ländern mit der weltweit geringsten jährlich verfügbaren Wassermenge (Epule Epule et al. 2023; Weltbank 2024b). Die marokkanische Regierung hat verschiedene Strategien umgesetzt, um die Bewässerung in der Landwirtschaft zu verbessern (ebd.).

Marokko verzeichnet jährlich ca. 29 Milliarden m³ Niederschlag, wovon 69 % als mobilisierbares Wasserkraftpotenzial gelten (El Fartassi et al. 2023). Die landwirtschaftlich genutzten Flächen verteilen sich zu 81 % auf Regenfeldbau, zu 9 % auf großflächige Bewässerung, zu 4 % auf kleine und mittlere Bewässerung und zu 6 % auf private Bewässerungssysteme (Abbildung 11) (El Fartassi et al. 2023; Statista 2025d).

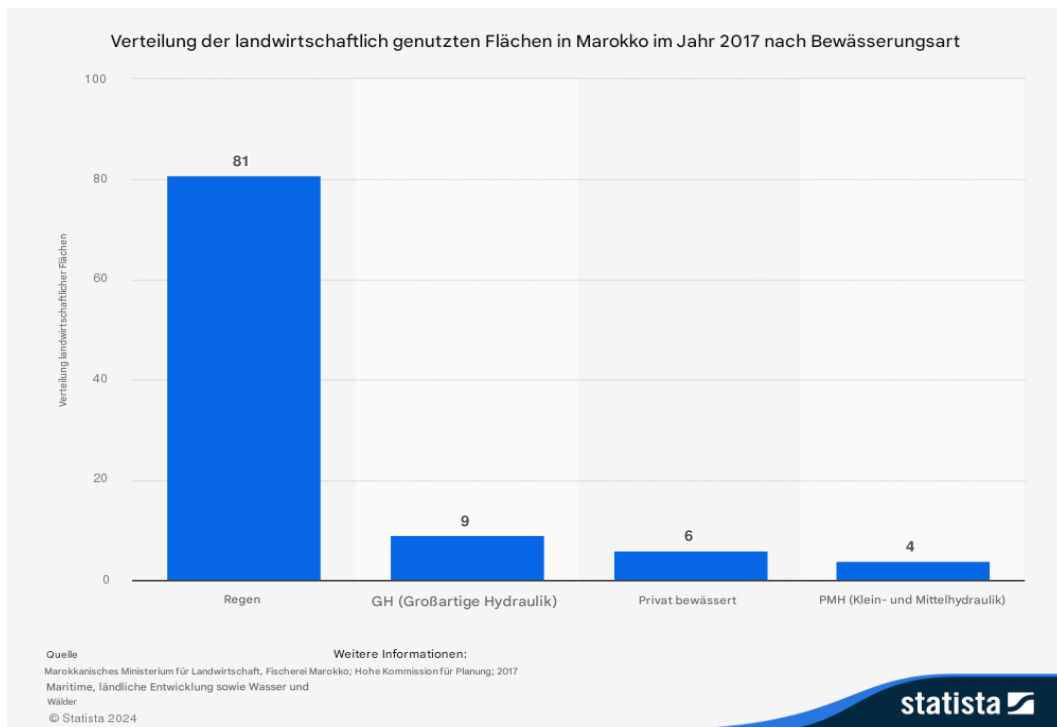


Abbildung 11: Verteilung der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Marokko im Jahr 2017 nach Art der Bewässerung (Statista 2025d).

Die Landwirtschaft in Marokko verbraucht bis zu 87 % der Wasserressourcen (HCP 2020a). Die verfügbaren Daten zeigen, dass die Effizienz der derzeitigen Bewässerungssysteme gering bis sehr mittelmäßig ist (Azouggagh 2001). Die Wasserverluste auf den Feldern liegen zwischen 30 und 40 %, hauptsächlich durch Versickerung (ebd.). Außerdem ist die Bewässerung ungleichmäßig, was sich negativ auf die Produktion auswirkt (ebd.).

Die Bewässerungssysteme lassen sich in zwei Hauptkategorien einteilen: Schwerkraft- und Druckbewässerung (Azouggagh 2001). Etwa 80 % der Fläche der großen Bewässerungsgebiete in Marokko werden durch Schwerkraftbewässerung abgedeckt, wodurch die Wasserverluste beträchtlich bleiben (El Hasnaoui et al. 2009). In der Praxis wird zwischen Schwerkraftbewässerung, Tröpfchenbewässerung und Sprinklerbewässerung unterschieden (Azouggagh 2001).

Marokko plant, die Bewässerungstechnologie bis 2030 auf eine Gesamtfläche von einer Million Hektar auszuweiten (Arredondas 2024). Dank der Initiativen des Landwirtschaftsministeriums könnte die Gesamtfläche der bewässerten Flächen auf 1,8 Millionen Hektar steigen und die Bewässerungsnetze auf mehr als 175.000 Hektar erneuert werden, von denen mehr als 80 Prozent von Kleinbauern bewirtschaftet werden(ebd.). Weiterhin wurden 850.000 Hektar mit Tröpfchenbewässerungssystemen ausgestattet (ebd.). Marokko intensiviert die Umsetzung des Nationalen Programms für Trinkwasserversorgung und Bewässerung (PNAEPI) 2020-2027 und der Strategie Green Generation 2020-2030 (Aenverde 2024). Ende 2023 hat Marokko 824.000 Hektar mit lokaler Bewässerung ausgestattet, was 50 % der bewässerten Fläche entspricht. Ziel ist es, diese Zahl bis 2030 auf eine Million Hektar zu erhöhen (ebd.).

3.6 Wichtige Anbauprodukte

Die marokkanische Landwirtschaft stellt sich als vielschichtiges System dar, das sowohl pflanzliche als auch tierische Produkte umfasst und einen wichtigen Beitrag zur Volkswirtschaft und zur Ernährungssicherheit leistet (MEF 2019). Getreidekulturen wie Weizen und Gerste bilden die Basis der pflanzlichen Produktion, während Zitrusfrüchte wie Orangen und Klementinen sowie Oliven eine wichtige Rolle im Exportsektor spielen (Agrimaroc 2024). Ergänzt wird dieses Spektrum durch eine Vielzahl von Obstsorten, darunter Mandeln, Äpfel und Aprikosen, sowie durch Zuckerrüben und Hülsenfrüchte, die eine wesentliche Grundlage für die Nahrungsmittelproduktion darstellen (Agrimaroc 2024). Darüber hinaus sind Gemüsekulturen wie Kartoffeln und Tomaten von großer Bedeutung für die Versorgung der Bevölkerung und tragen zur Diversifizierung der landwirtschaftlichen Produktion bei (Amachraa 2023). Die Viehzucht, insbesondere Schafe, Ziegen, Rinder, Kamele und Geflügel, ist ein integraler Bestandteil des Agrarsektors und trägt wesentlich zur Ernährungssicherheit und zum wirtschaftlichen Wohlstand des Landes bei (Agrimaroc 2024).

Im Folgenden wird ein Überblick über die wichtigsten Sektoren der marokkanischen Landwirtschaft gegeben (Abbildung 12, Abbildung 13).

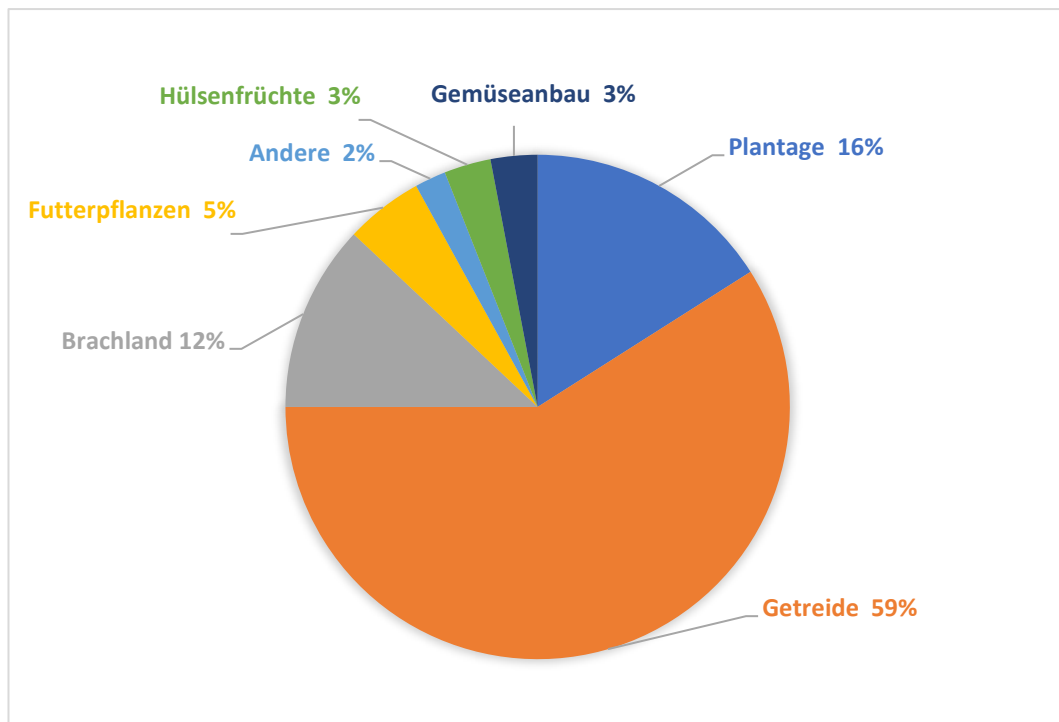


Abbildung 12: Verteilung der landwirtschaftlichen Nutzfläche LN nach Nutzungsart (MAPMDREF 2019).

Der marokkanische Zitrussektor ist ein dynamischer und wichtiger Sektor innerhalb der marokkanischen Landwirtschaft, der sich durch eine bemerkenswerte Vielfalt an angebauten Sorten auszeichnet, auch wenn drei Hauptgruppen - Clementinen (35 %), Maroc-Late (21 %) und Navels (18 %) - weiterhin den Markt dominieren (MAPMDREF 2021a). Die geografische Verteilung der Anbauflächen für Zitrusfrüchte konzentriert sich im Wesentlichen auf fünf Regionen des Königreichs, wobei Souss-Massa mit einem Anteil von 32% an erster Stelle steht, gefolgt von Rabat-Salé-Kénitra (20%), dem Osten (17%), Béni Mellal-Khénifra (14%) und Marrakech-Safi (13%) (ebd.). Zwischen 2008 und 2019 hat die Anbaufläche um 52% von 84.000 auf 128.000 Hektar zugenommen, was auf eine positive Entwicklung und Investitionen in den Sektor hindeutet (ebd.). Parallel dazu ist die Produktion noch stärker gestiegen, nämlich um 84 % auf eine durchschnittliche Jahresproduktion von 2,4 Millionen Tonnen im Zeitraum 2015-2019 gegenüber 1,3 Millionen Tonnen im Zeitraum 2003-2007 (ebd.).

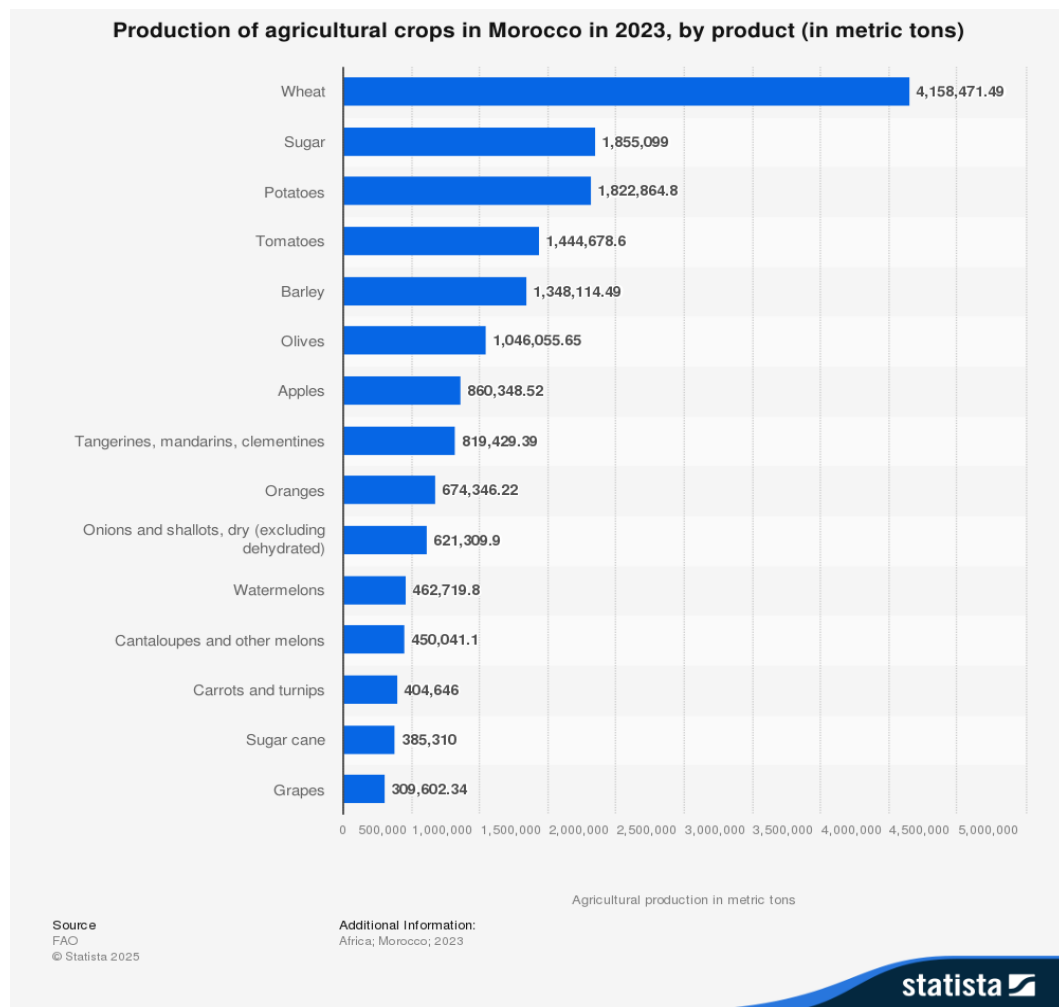


Abbildung 13: Produktion landwirtschaftlicher Erzeugnisse in Marokko im Jahr 2023 nach Produkten (Statista 2025a).

Auch die Exporte sind in den letzten vier Jahren um 22 % auf durchschnittlich 644.000 Tonnen pro Jahr gestiegen, was die wachsende internationale Wettbewerbsfähigkeit des marokkanischen Zitrussektors unterstreicht (ebd.). Die Zitrusindustrie hat sich als zweitgrößter Exporteur von Agrarprodukten etabliert und trägt damit maßgeblich zur Devisenbeschaffung des Landes bei (ebd.).

Der Gemüseanbau in Marokko stellt einen vitalen und dynamischen Sektor innerhalb des gesamten Agrarsystems dar, der sowohl den inländischen Verbrauch deckt als auch ein bedeutendes Exportpotenzial aufweist (Et-Touile 2023). Bemerkenswert ist, dass der Gemüseanbau etwa 60 Millionen Arbeitstage pro Jahr generiert, was etwa 200.000 Dauerarbeitsplätzen entspricht, was seinen bedeutenden sozioökonomischen Einfluss verdeutlicht (INRA o. J.). Ein wichtiger Bestandteil des marokkanischen Gemüseanbaus ist der Anbau von Frühgemüse, der sich über eine Fläche von etwa 40.000 Hektar erstreckt, was 15 % der gesamten

Gemüseanbaufläche entspricht (INRA o. J.; MAPMDREF 2021a). Der bemerkenswerte Anstieg des Exportumsatzes auf 13,7 Milliarden MAD im Jahr 2019, verbunden mit einer Wertschöpfung von 5,2 Milliarden MAD, unterstreicht die wachsende Bedeutung dieses Sektors für die marokkanische Wirtschaft (MAPMDREF 2021a). Diese Zahlen belegen eine beachtliche Effizienz in der Produktion und Vermarktung von Gemüseprodukten (ebd.). Die marokkanische Landwirtschaft ist ein wichtiger Produzent von Zitrusfrüchten, Tomaten und Oliven (Amachraa 2023). Darüber hinaus leistet der Sektor einen wichtigen Beitrag zur marokkanischen Wirtschaft (ebd.). Ein bemerkenswertes Beispiel für das Wachstum und die Diversifizierung des marokkanischen Gemüseanbaus ist der Anstieg der Exporte von Süßkartoffeln (EastFruit 2023b). Die Exporte betrugen im Jahr 2018 nur 23 Tonnen, werden sie bis 2022 auf 1.200 Tonnen anstiegen, was einer Verhundertfachung in nur fünf Jahren entspricht (ebd.).

Der marokkanische Obstanbau hat seit 2008 eine bemerkenswerte Expansion erfahren, die sich in einer Zunahme der Anbaufläche um ca. 46 % auf 377.000 Hektar manifestiert, was 5 % der gesamten Ackerfläche des Landes entspricht (MAPMDREF 2021a). Diese Entwicklung unterstreicht die wachsende Bedeutung des Obstbausektors für die marokkanische Landwirtschaft und Wirtschaft. Die geografische Verteilung dieser Produktionskette konzentriert sich hauptsächlich auf die Regionen Fes-Meknès (27%), Tanger-Tetouan-Al Hoceima (20%) und die Region Oriental (13%), die zusammen einen Großteil der Obstproduktion des Landes ausmachen (ebd.). Die Diversifizierung des Sektors spiegelt sich in der Vielfalt der angebauten Obstsorten wider, die sich in Steinobst, Kernobst und andere Arten unterteilen lassen (Abbildung 14) (MAPMDREF 2021a). Steinobst nimmt mit 234.981 Hektar und einer Produktionsmenge von 350.548 Tonnen den größten Teil der Anbaufläche ein, während Kernobst auf 57.140 Hektar angebaut wird und eine höhere Produktionsmenge von 380.883 Tonnen erreicht (ebd.). Andere Obstkulturen werden auf 84.715 Hektar angebaut und tragen mit einer Produktionsmenge von 280.300 Tonnen zur Gesamtproduktion bei (ebd.).

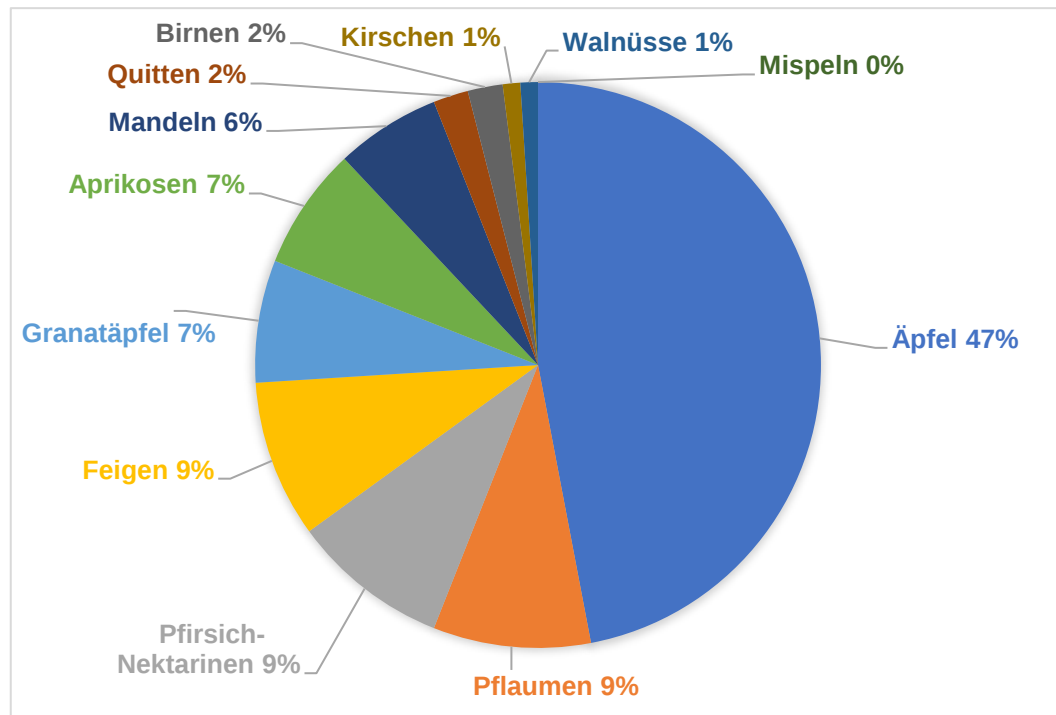


Abbildung 14: Verteilung der Produktion von Obstbäumen für das Jahr 2019 (MAPMDREF 2021a).

Im Jahr 2022 war Marokko mit 53.000 Tonnen weltweit der viertgrößte Exporteur von frischen Heidelbeeren (EastFruit 2023b). Darüber hinaus war Marokko im selben Jahr der drittgrößte Exporteur von frischen Himbeeren, was seine wachsende Bedeutung im Bereich der Beerenobstproduktion unterstreicht (ebd.). Ein weiteres Beispiel für das Wachstum des Landes im Agrarsektor sind die marokkanischen Apfelproduktionszahlen, die zwischen 2012 und 2021 um beeindruckende 83 % auf fast 900.000 Tonnen gestiegen sind (ebd.).

Trotz der Erfolge im Obst- und Gemüseexport bleibt der Getreideanbau mit 59 % der LN ein wichtiger Bestandteil der marokkanischen Landwirtschaft, wobei vor allem Weichweizen, Gerste und Hartweizen angebaut werden (MAPMDREF 2019). Die Getreideproduktion ist jedoch stark von den Niederschlagsmengen abhängig, was zu erheblichen Schwankungen führt (ebd.). Selbst in Jahren mit günstigen Witterungsbedingungen reicht die nationale Produktion oft nicht aus, um den Bedarf des Landes zu decken (ebd.). Im Wirtschaftsjahr 2014-2015 wurde mit 115 Millionen Doppelzentnern ein Rekord erzielt (Agrimaroc 2024). Hülsenfrüchte spielen ebenfalls eine wichtige Rolle in der marokkanischen Ernährung, auch wenn ihre Anbauflächen tendenziell zugunsten rentablerer Kulturen zurückgehen (ebd.).

3.7 Regierungspolitik und Reformen

Die marokkanische Agrarpolitik zielt darauf ab, den Agrarsektor zu modernisieren, die landwirtschaftliche Wertschöpfung zu erhöhen und eine umweltfreundliche Landwirtschaft zu fördern (Amachraa 2023). Die aktuelle Agrarpolitik konzentriert sich auf die Steigerung der landwirtschaftlichen Wertschöpfung durch die Förderung der lokalen Produktion, die Verbesserung der Qualitätsstandards, die Stärkung der Wertschöpfungsketten und die Schaffung eines günstigen Umfelds für die Schaffung von Arbeitsplätzen (MEF 2019). Darüber hinaus umfasst die Agrarpolitik den Ausbau der Bewässerungsinfrastruktur und die effiziente Wassernutzung (Amachraa 2023).

Mit der Einführung des PMV im Jahr 2008 wurden ambitionierte Ziele zur Steigerung der landwirtschaftlichen Produktion, der Einkommen und der nachhaltigen Entwicklung ländlicher Regionen formuliert (Faysse 2015; MEF 2019). Staatliche Interventionen zielten darauf ab, die duale Struktur des Sektors zu überwinden, Investitionen zu stimulieren und die Organisation der Wertschöpfungsketten zu optimieren (Faysse 2015).

Der PMV hat signifikante Erfolge erzielt, darunter den Anbau hochwertiger Produkte auf 400.000 Hektar, eine verbesserte Wassereffizienz durch die Umstellung auf Tröpfchenbewässerung auf 220.000 Hektar und einen verbesserten Zugang zu Betriebsmitteln (Weltbank 2017b). Im Jahr 2013 generierten hochwertige Produkte ein Drittel der landwirtschaftlichen Wertschöpfung und schufen bis zu drei Millionen Arbeitsplätze (ebd.). Zwischen 2008 und 2013 verzeichneten diese Teilspektoren ein Produktivitäts- und Flächenwachstum (ebd.).

Die Nachfolgestrategie „Generation Verte 2020-2030“ baut auf den Errungenschaften des PMV auf und adressiert die verbleibenden Herausforderungen in den Wertschöpfungsketten (MAPMDREF 2021b). Die Strategie baut auf den Erfolgen des vorangegangenen PMV auf und zielt darauf ab, die verschiedenen Stufen der landwirtschaftlichen Produktion noch besser miteinander zu verknüpfen (ebd.). Ein wichtiges Ziel ist es, mehr Landwirte zu unterstützen, um den landwirtschaftlichen Mittelstand zu stärken. Im Rahmen der Strategie "Génération Green 2020-2030", die von König Mohammed VI (ebd.) im Februar 2020 ins Leben gerufen wurde, hat die Regierung umfangreiche Maßnahmen zur Wasseroptimierung eingeleitet, darunter die Installation moderner Bewässerungssysteme auf 555.000 Hektar Land, was etwa 55-60% der gesamten bewässerten Fläche entspricht (ebd.).

Gleichzeitig sollen eine neue Generation junger Unternehmer gefördert und mehr Arbeitsplätze geschaffen werden (MAPMDREF 2021b). Die Strategie "Génération Green 2020-2030" basiert auf zwei Hauptpfeilern: der Förderung des menschlichen Elements durch die Schaffung einer neuen landwirtschaftlichen Mittelschicht (350.000 bis 400.000 Haushalte) und der Förderung einer neuen Generation von Jungunternehmern mit dem Ziel, 350.000 Arbeitsplätze für junge Menschen zu schaffen (ebd.). Parallel dazu soll die Entwicklungsdynamik des Sektors aufrechterhalten werden, mit dem ehrgeizigen Ziel, die Exporte von 50 auf 60 Milliarden MAD und das landwirtschaftliche BIP von 200 auf 250 Milliarden MAD bis 2030 zu verdoppeln (ebd.).

Die Steuerung des Agrarsektors erfolgt durch staatliche Regulierung in Form von Preisüberwachung und Subventionen, insbesondere für Grundprodukte wie Weizen, Zucker, Ölsaaten und Milch (MAPMDREF 2021a). Dieses System soll Produzenten und Konsumenten vor Preisschwankungen schützen und die internationale Wettbewerbsfähigkeit sichern (ebd.). Die Subventionen tragen zur Einkommensstützung der Landwirte bei und können so die Verbraucherpreise stabilisieren, wodurch Marktrisiken auf den Staatshaushalt verlagert werden (ebd.).

Die marokkanische Gesamtstrategie für den Agrar- und Ernährungssektor zielt darauf ab, die Wassernutzung zu optimieren, die Existenzgrundlage der Landwirte zu sichern, Arbeitsplätze im ländlichen Raum zu schaffen und die Produktivität zu steigern (Weltbank 2024a). Die Förderung eines nachhaltigen Wassermanagements soll Marokko als führenden Akteur im Agrarsektor positionieren und seine Exportkapazitäten auf regionalen Märkten erhöhen (ebd.).

3.8 Herausforderungen: Extremwetter und Gefahren

Der Klimawandel stellt eine große Bedrohung für die marokkanische Landwirtschaft dar. Die daraus resultierenden Veränderungen gefährden wichtige natürliche Ressourcen, verstärken die inhärente Volatilität der landwirtschaftlichen Produktivität und haben negative wirtschaftliche, soziale und ökologische Folgen für die Bevölkerung (IRES 2024). Beispielsweise prognostiziert IRES (L'Institut Royal des Etudes Stratégiques), dass ein Dürrejahr zu einem potenziellen Rückgang der Getreideerträge um bis zu 70 % im Vergleich zu normalen Jahren führen kann (ebd.). Der beobachtete Trend abnehmender Niederschläge und Schneefälle, gekoppelt mit einer Zunahme extremer Temperaturereignisse wie Hitzewellen und ungewöhnlich warmen Winden, führt zu einer erhöhten Häufigkeit und Ausbreitung

meteorologischer, landwirtschaftlicher und hydrologischer Dürren (ebd.). Die räumliche und zeitliche Intensivierung der klimatischen Trockenheit führt zu einem signifikanten Anstieg des Wasserbedarfs in der Landwirtschaft - bedingt durch erhöhte Evapotranspiration und Verdunstung - bei gleichzeitig abnehmenden Niederschlagsbeiträgen (ebd.). Diese Bedingungen beeinflussen die Produktionszyklen von Feldfrüchten, Nutztieren, Weiden und Wäldern erheblich und führen zu signifikanten Produktivitätsverlusten (ebd.).

Neben den schleichenden Auswirkungen des Klimawandels ist Marokko auch anfällig für abrupte Naturkatastrophen (Abbildung 15). Historisch betrachtet hat das Land zahlreiche schwere Ereignisse wie Erdbeben, Erdrutsche und Überschwemmungen erlebt, die zu hohen Verlusten an Menschenleben und erheblichen Sachschäden geführt haben (Loudyi et al. 2022). Insbesondere die Anfälligkeit Marokkos für Überschwemmungen durch extreme Niederschlagsereignisse ist bereits dokumentiert (Satour et al. 2021). Zwischen 2000 und 2021 wurden in Marokko mehr als 20 größere Überschwemmungen registriert, die einen durchschnittlichen, jährlichen direkten Schaden von etwa 450 Millionen US-Dollar verursachten (UNFCCC 2023). Überschwemmungen machen 70 % der offiziell anerkannten klimabedingten Katastrophen aus und betreffen die meisten Menschen in Marokko direkt, verbunden mit erheblichen wirtschaftlichen Schäden (ebd.).

Im Zeitraum 2000 bis 2020 war Marokko Schauplatz mehrerer schwerer Naturkatastrophen. Dazu zählen das Erdbeben von Al-Hoceima im Februar 2004, der Erdrutsch von Taourart-Akchour im Rif-Gebirge im November 2010 sowie wiederholte Überschwemmungen in städtischen Zentren wie Mohammedia (November 2002), Tanger (Oktober 2008, Dezember 2009, Januar 2013) und Casablanca (November 2010, Januar 2013). Auch ländliche Regionen wie die Gharb-Ebene (2008) sowie die südlichen Wüstengebiete Guelmim und Sidi Ifni (November 2014), Laayoune-Saquia Al Hamra (Oktober 2016) und Taroudant (2019) waren betroffen (Loudyi et al. 2022).

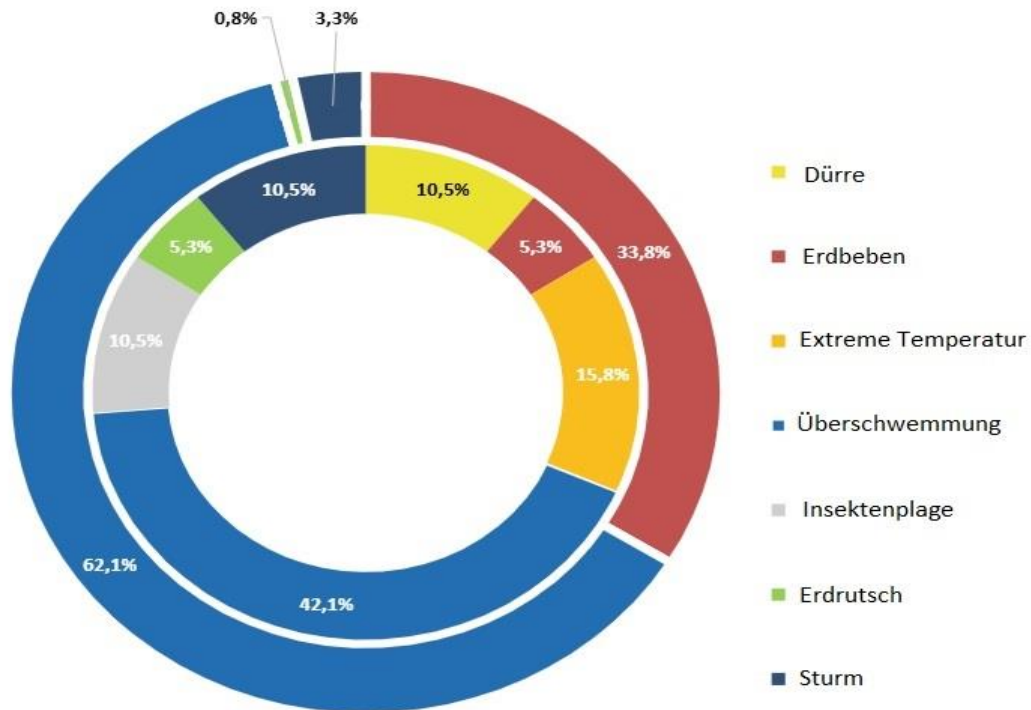


Abbildung 15: Gemeldete Naturkatastrophen in Marokko 1970–2020: Häufigkeit (innerer Ring); Anzahl der Todesfälle (äußerer Ring) (Loudyi et al. 2022) .

Das Jahr 2022 war für Marokko das schlimmste Dürrejahr seit fast vier Jahrzehnten (Toreti et al. 2024). Das Land verzeichnete ein signifikantes Niederschlagsdefizit, verbunden mit einem besorgniserregenden Rückgang der Reserven in den Stauseen (ebd.). Neben den klimatischen Faktoren tragen der hohe Wasserbedarf und die Übernutzung der Grundwasserressourcen wesentlich zur Belastung der Wasserressourcen bei (ebd.). Im Jahr 2023 erlebte Marokko das heißeste Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen, wie aus dem Bericht der marokkanischen Generaldirektion für Meteorologie hervorgeht (DGM 2024). Mit einer Durchschnittstemperatur von 1,77 °C über dem Mittelwert der Referenzperiode 1981-2010 war 2023 das wärmste Jahr seit mindestens Anfang des 20. Jahrhunderts und übertraf den bisherigen Rekord von 2022 um 0,14 °C (ebd.). Die Monate März, April, August und Oktober verzeichneten jeweils die höchsten Durchschnittstemperaturen seit Beginn der Aufzeichnungen (ebd.). An 279 Tagen des Jahres (79 %) lagen die Tagesmitteltemperaturen über dem Normalwert (ebd.). Ein neuer, nationaler Höchstwert für die Tageshöchsttemperatur wurde am 11. August 2023 in Agadir mit 50,4 °C registriert, womit erstmals in Marokko die 50 °C-Marke überschritten wurde (ebd.).

Hinsichtlich der Niederschläge gilt 2023 als das trockenste Jahr seit mindestens 80 Jahren mit einem Niederschlagsdefizit von fast 48 % (DGM 2024). Darüber hinaus ist 2023 das fünfte Trockenjahr in Folge in Marokko und markiert damit die längste Trockenperiode in der modernen Geschichte des Landes (ebd.). In den letzten fünf Jahren lag das durchschnittliche Niederschlagsdefizit bei etwa 35%, was diesen Zeitraum als extreme Trockenperiode kennzeichnet (ebd.).

Die landwirtschaftliche Saison 2022-2023 war durch ein erhebliches Niederschlagsdefizit gekennzeichnet, das in der Spitze 29,22 % unter dem Durchschnitt lag (DGM 2024). Außerdem war die räumliche und zeitliche Verteilung der Niederschläge unregelmäßig, was die Auswirkungen der fünf vorangegangenen Dürrejahre noch verstärkte (ebd.). Der verspätete Beginn der Regenzeit und die ungleichmäßige Verteilung der Niederschläge wirkten sich negativ auf die Herbstsaat und die Feldbedingungen aus (ebd.). Diese Situation wurde durch die ungewöhnlich hohen Temperaturen noch verschärft (ebd.).

Im Jahr 2023 wurden in Marokko mehr als 20 extreme Wetterereignisse registriert, die jeweils durch Unwetterwarnungen angekündigt wurden. Dazu gehörten Starkniederschläge, Hitze- und Kältewellen sowie starke Schneefälle und Winde (DGM 2024). Ein bemerkenswertes Phänomen war die frühe Hitzewelle Ende April 2023, die weite Teile Süd- und Osteuropas sowie Nordafrikas mit extrem hohen Temperaturen überzog (ebd.). Trotz eines insgesamt trockenen Jahres kam es im Februar in mehreren Regionen des Hohen und Anti-Atlas zu sehr starken Schneefällen mit ungewöhnlichen Schneehöhen (bis zu 2 m), die ein Eingreifen der Behörden zur Wiederherstellung der Zugänglichkeit erforderlich machten (ebd.).

Auch andere extreme Wetterereignisse wie Sturm, Hagel und heftige Gewitter verursachen Schäden. Es gibt Hinweise darauf, dass Hagelereignisse in Marokko teilweise mit dem Klimawandel zusammenhängen (Maazouz 2016). Hagel kann erhebliche Schäden in der Landwirtschaft verursachen und beispielsweise die gesamte Apfelproduktion vernichten (ebd.). Das primär betroffene Organ ist die Frucht, wobei die physischen Schäden und die Verringerung der Blattfläche die Fruchtqualität beeinträchtigen und das Risiko des Eindringens von Krankheitserregern durch Verletzungen erhöhen (ebd.).

Am 6. Juni 2020 kam es in der Region Fes-Meknes und Umgebung zu Hagelstürmen, die erhebliche Schäden im Gartenbau und in der Landwirtschaft verursachten (Agrimaroc 2020). Nach Schätzungen des Landwirtschaftsministeriums waren

insgesamt 9.100 ha in 27 ländlichen Gemeinden der Region Fes-Meknes betroffen (ebd.). Die intensiven Regenfälle verursachten lokal erhebliche Schäden und beschädigten die landwirtschaftliche Infrastruktur, was zu Ernteaussfällen bei den Landwirten in der Region Fes-Meknes führte (ebd.). Die geschätzten Verluste schwanken je nach Region und Kultur zwischen 20 und 80 % (ebd.). In Gebieten mit Schutznetzen oder kälteresistenten Lagern konnten die Auswirkungen des Sturms im Allgemeinen vermieden werden (ebd.).

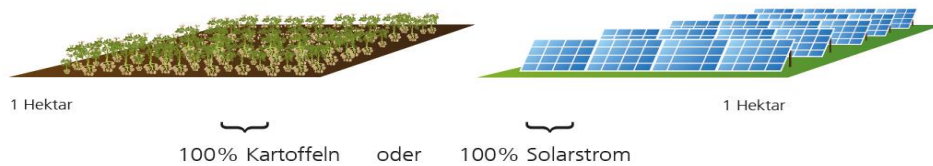
4. Agriphotovoltaik Konzept

4.1 Definition, Entwicklung, Potenziale und Verbreitung

Die Agriphotovoltaik (APV) stellt ein innovatives Landnutzungskonzept dar, das auf der gleichzeitigen Nutzung landwirtschaftlicher Flächen für die primäre Produktion von Nahrungsmitteln und die sekundäre Erzeugung von Solarenergie basiert. Dieser synergetische Ansatz adressiert die zunehmende Landnutzungskonkurrenz, die sich aus dem forcierten Ausbau erneuerbarer Energien und der Notwendigkeit der globalen Ernährungssicherung ergibt (Toledo und Scognamiglio 2021; Trommsdorff et al. 2024). Die Definition von APV durch das Normungsinstitut in der DIN SPEC 91434; 2021-05 lautet: „Agri-Photovoltaik kombinierte Nutzung ein und derselben Landfläche für die landwirtschaftliche Produktion als Hauptnutzung und für die Stromerzeugung mittels einer PV-Anlage als Nebennutzung“ (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021).

Das Grundprinzip der APV, erstmals 1982 von Goetzberger und Zastrow formuliert, postulierte die Modifikation von Sonnenkollektoren, um eine gleichzeitige Pflanzenproduktion auf derselben Flächeneinheit zu ermöglichen können (Goetzberger und Zastrow 1981). Im Laufe der wissenschaftlichen und technologischen Entwicklung hat sich ein heterogenes Nomenklatursystem etabliert, das mit Begriffen wie "Agri-PV", "Agro-PV", "Solar Sharing", "Agrisolar", "Agrivoltaics", "Agrophotovoltaik", "pollinator friendly solar" oder mit ähnlichen Begriffen in verschiedenen Teilen der Welt und für unterschiedliche Anwendungen bezeichnet wird (Gorjian et al. 2022; Macknick et al. 2022; Soto-Gómez 2024). Es zielt darauf ab, Land für landwirtschaftliche Zwecke zu nutzen und gleichzeitig PV-Strom zu erzeugen, um so die Effizienz der Landnutzung zu erhöhen (Abbildung 16) (ebd.).

Getrennte Flächennutzung auf 1 Hektar Ackerland: 100% Kartoffeln oder 100% Solarstrom



Gemischte Flächennutzung auf 1 Hektar Ackerland: 186% Landnutzungseffizienz

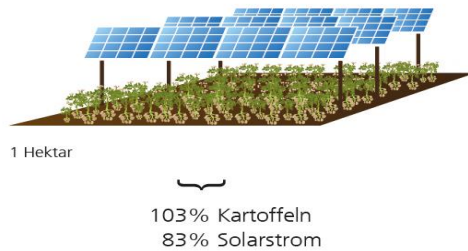


Illustration Kartoffeln © HappyPictures / shutterstock.com

Abbildung 16: Ein theoretisches Beispiel, das ein getrenntes System von landwirtschaftlicher Nutzung und Freiflächenphotovoltaik mit einem integrierten Ansatz vergleicht, bei dem Ackerbau und Energieerzeugung durch APV auf derselben Fläche kombiniert werden (Fraunhofer ISE 2019).

Bei der APV wird die Integration von PV-Modulen in landwirtschaftliche Produktionssysteme umgesetzt (Ghosh 2023). Die Module werden so installiert, dass eine ausreichende Transmission des Sonnenlichts zur Aufrechterhaltung des Pflanzenwachstums gewährleistet ist und gleichzeitig die Umwandlung der Sonnenstrahlung in elektrische Energie erfolgt (Hassan et al. 2023). Aus ökonomischer Sicht kann die Realisierung von APV-Systemen, insbesondere bei Systemen mit signifikanter Nennleistung im Durchschnitt kostengünstiger sein als vergleichbare gebäudeintegrierte Photovoltaiksysteme (BIPV), was zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit erneuerbarer Energietechnologien beiträgt (Trommsdorff et al. 2024). Darüber hinaus generieren APV-Systeme im Idealfall einen additiven Nutzen für das Pflanzenwachstum, während BIPV-Systeme primär flächenneutral wirken (ebd.). APV wird als ressourceneffiziente Landnutzungsstrategie klassifiziert, die eine kohärente Integration von Solarstromerzeugung und landwirtschaftlicher Produktion ermöglicht (Fraunhofer ISE 2017). In den letzten Jahren hat die Relevanz der APV deutlich zugenommen, was sich in einer steigenden Anzahl von Forschungsinitiativen, Pilotprojekten und kommerziellen Anlagen manifestiert (Toledo und Scognamiglio 2021). Die duale Landnutzung führt zu einer signifikanten Steigerung der Landnutzungseffizienz und birgt das Potenzial, die Bodendegradation zu

reduzieren, hauptsächlich vor dem Hintergrund zunehmender und intensiverer Extremwetterereignisse wie Hitzewellen, Starkniederschläge oder Dürreperioden (Trommsdorff et al. 2024).

Die Vorteile der APV sind vielfältig und umfassen sowohl ökologische als auch ökonomische Dimensionen (Schindele et al. 2020). Durch die Symbiose von Solarstromerzeugung und landwirtschaftlicher Produktion entstehen Synergieeffekte, die die Effizienz des Gesamtsystems steigern können (Wydra et al. 2023; Trommsdorff et al. 2024). Beispielsweise können PV-Module als Schutzbauwerk gegen übermäßige Sonneneinstrahlung, Hagel oder Frost fungieren und so die Ernteerträge insbesondere bei anfälligen Nutzpflanzen optimieren (Wydra et al. 2022; Wydra et al. 2023; Trommsdorff et al. 2024). Darüber hinaus kann die Beschattung der Module durch die Vegetation zu einer Verringerung der Modultemperatur beitragen, was potenziell die Effizienz der photovoltaischen Energieumwandlung erhöht (ebd.). Studien deuten darauf hin, dass APV-Systeme den landwirtschaftlichen Wasserbedarf reduzieren können, da die partielle Beschattung die Evapotranspiration verringert (Zainali et al. 2025). In ariden und semi-ariden Regionen kann APV einen substanziellen Beitrag zur Desertifikationsbekämpfung leisten, indem sie mikroklimatische Verbesserungen durch Verschattung induziert und die Bodenqualität positiv beeinflusst (Magarelli et al. 2025).

Die technischen Umsetzungsstrategien zur Integration von PV in die Landwirtschaft sind vielfältig und lassen sich im Wesentlichen in offene und geschlossene Systeme kategorisieren (Abbildung 17) (Gorjian et al. 2022). Offene APV-Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass die PV-Module oberhalb der landwirtschaftlich genutzten Flächen installiert werden, was eine natürliche Belüftung und eine uneingeschränkte Bewirtschaftung der darunter liegenden Flächen ermöglicht (Toledo und Scognamiglio 2021; Trommsdorff et al. 2024). Geschlossene Systeme hingegen integrieren PV-Module in Gewächshausstrukturen oder vergleichbare geschlossene Architekturen mit dem Ziel, kontrollierte Mikroklimata zu schaffen (Toledo und Scognamiglio 2021; Trommsdorff et al. 2024). Umfangreiche Forschungsarbeiten haben das Potenzial der APV in Bezug auf verschiedene Kulturarten, Konstruktionsvarianten und den Einsatz von Nachführsystemen für PV-Module untersucht (Willockx et al. 2023; Asa'a et al. 2024; Jamil et al. 2024; Hussain und Ghosh 2024). Die Ergebnisse zeigen, dass eine Vielzahl von Kulturarten unter APV-Bedingungen adäquat gedeihen kann, was Rückschlüsse auf die Kompatibilität von Kulturen und PV-Systemen zulässt (ebd.). Die geometrische Anordnung

der PV-Module und der Reihenabstand sind kritische Parameter zur Optimierung der Lichttransmission für die Pflanzen (Hickey et al. 2024; Apriani et al. 2024). Weitere Studien haben das Potenzial der APV in Bezug auf verschiedene Kulturen, Bauweisen und die Nachführung der PV-Module aufgezeigt (Weselek et al. 2021; Toledo und Scognamiglio 2021; Wydra et al. 2023; Alam und Butt 2024). Die APV kann einen wichtigen Beitrag zur Diversifizierung der Energieversorgung und zur Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern leisten (Asa'a et al. 2024; Trommsdorff et al. 2024).

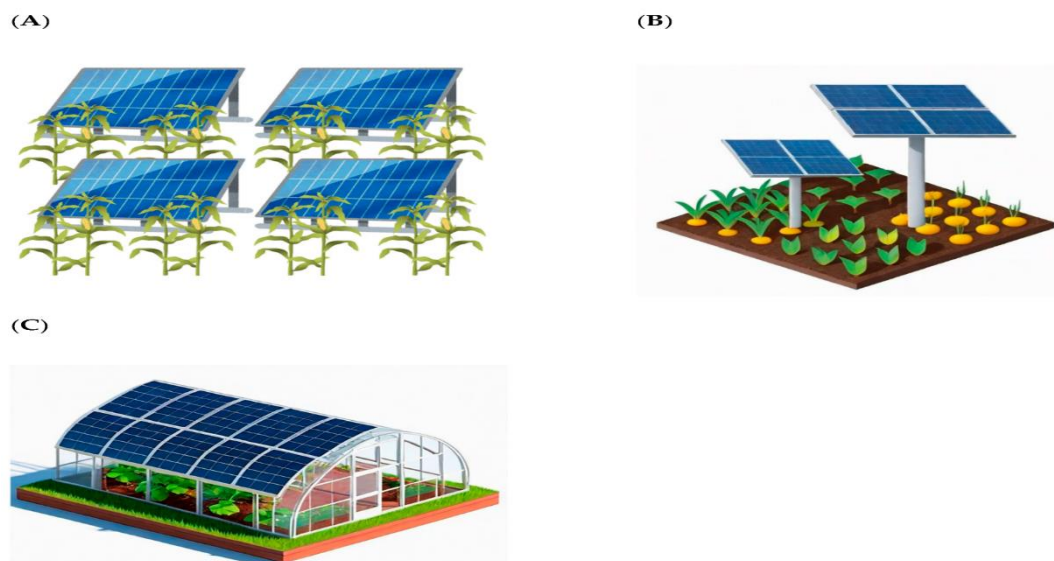


Abbildung 17: Schematische Darstellung der verschiedenen Arten von APV-Systemen. Sie können in offene Systeme (A), Systeme zwischen den Pflanzen (B) oder über den Pflanzen und geschlossene Systeme (C), z. B. in einer Gewächshauskonstruktion, eingeteilt werden (Soto-Gómez 2024).

Die Konfiguration der PV-Module und die Dimensionierung der Abstände zwischen den Reihen sind von entscheidender Bedeutung für die Optimierung der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) für die darunter angebauten Pflanzen (Fernández-Solas et al. 2023; Mouhib et al. 2024). APV-Systeme weisen ein breites Anwendungsspektrum in verschiedenen landwirtschaftlichen Sektoren auf, vom Acker- und Gemüsebau bis hin zum Obst- und Weinbau (Trommsdorff et al. 2024; Magarelli et al. 2025). Zukünftige Forschungsfelder der APV umfassen detaillierte Potenzialanalysen für spezifische Kulturen, innovative Bauweisen, den Einsatz von Nachführtechnologien für PV-Module sowie die Validierung von Modellen zur präzisen Ertragsprognose (Rösch und Fakharizadehshirazi 2024; Asa'a et al. 2024; Trommsdorff et al. 2024). Darüber hinaus sind die Integration von Energiespeicherlösungen, organischen PV-Folien und solarbetriebene Systeme zur

Wasseraufbereitung und -verteilung sowie die Implementierung elektrischer Landmaschinen und intelligenter, automatisierter Feldbearbeitung vielversprechende Forschungsrichtungen (Gorjian et al. 2022; Trommsdorff et al. 2022). Die langfristige Vision ist die Etablierung der APV als integraler Bestandteil einer nachhaltigen Landwirtschaft, die gleichermaßen zur Energieversorgung und zur Nahrungsmittelproduktion beiträgt (Gorjian et al. 2022; Soto-Gómez 2024). Darüber hinaus kann die APV zur regionalen Wertschöpfung beitragen, indem sie neue Arbeitsplätze schafft und die Einkommenssituation landwirtschaftlicher Betriebe verbessert (Semeraro et al. 2022; Rösch und Fakharizadehshirazi 2024). Insbesondere im Bereich der Sonderkulturen wie Wein-, Obst- und Gemüsebau birgt die Technologie ein erhebliches Wertschöpfungspotenzial, da diese Produktionssysteme häufig einen erhöhten Bedarf an Schutzmaßnahmen aufweisen (Trommsdorff et al. 2024; Magarelli et al. 2025).

Die APV stellt einen vielversprechenden Lösungsansatz zur Bewältigung der komplexen Herausforderungen der Energiewende und der Transformation zu einer nachhaltigen Landwirtschaft dar (Williams et al. 2025). Um mögliche Risiken zu minimieren und Synergieeffekte zu maximieren, ist eine sorgfältige Auswahl geeigneter Kulturpflanzen in Verbindung mit einem optimierten Anlagendesign unerlässlich (Trommsdorff et al. 2024). Die stetig wachsende Weltbevölkerung und der fortschreitende Klimawandel stellen die landwirtschaftliche Produktion vor immense Herausforderungen zur Sicherung der globalen Nahrungsmittelversorgung (van Dijk et al. 2021; Sun et al. 2024). Die APV kann einen wesentlichen Beitrag zur Bewältigung dieser Herausforderungen leisten, indem sie die Effizienz der landwirtschaftlichen Produktion steigert und gleichzeitig die Erzeugung erneuerbarer Energien ermöglicht (Widmer et al. 2024). Die Optimierung der Energieflüsse in APV-Systemen ist von entscheidender Bedeutung, da die Umwandlung natürlicher Ökosysteme in PV-Anlagen die Dynamik der Energieflüsse signifikant verändern kann, potenziell zu lokalen Temperaturerhöhungen führt und möglicherweise die Kohlenstoff- und Wasserflüsse in terrestrischen Ökosystemen beeinflusst (Barron-Gafford et al. 2019).

Die Integration von APV in Trockenfarmsysteme kann die Resilienz gegenüber zukünftigen Klimavariabilitäten erhöhen (Barron-Gafford et al. 2019). Dies geschieht durch die Verringerung von Dürrestress und die Steigerung der Produktivität von Nutzpflanzen wie Tomaten und Paprika bei gleichzeitiger Verringerung des Hitzestresses der PV-Module (Hassanpour Adeg et al. 2018; Barron-Gafford et al. 2019;

Widmer et al. 2024). Die Vorteile der APV gehen über die reine Energie- und Nahrungsmittelproduktion hinaus und umfassen auch ökologische Aspekte wie die Förderung der Biodiversität und den Schutz der Wasserressourcen (Widmer et al. 2024; Ludzuweit et al. 2025). Die durch APV erzeugte elektrische Energie kann direkt für den Betrieb von Kühl- und Verarbeitungsanlagen in landwirtschaftlichen Betrieben genutzt werden, wodurch die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen reduziert wird (Trommsdorff et al. 2024). Die Technologie der APV ist ausgereift und es gibt bereits zahlreiche kommerzielle Anwendungen weltweit (Weselek et al. 2019).

Die Verbreitung von APV-Systemen ist regional sehr unterschiedlich, wobei einige Länder eine Vorreiterrolle einnehmen, während andere noch am Anfang stehen (Trommsdorff et al. 2024). Insbesondere in Ländern mit begrenzten Landressourcen erweist sich die APV als vorteilhaft, da sie die gleichzeitige Nutzung von Flächen zur Stromerzeugung und zum Anbau von Feldfrüchten ermöglicht (Kim et al. 2021). Allerdings stehen die Nutzung von Freiflächen durch PV-Freiflächenanlagen und die Nahrungsmittelproduktion derzeit noch in Konkurrenz zueinander (Ghosh 2023; Trommsdorff et al. 2024). Durch die Kombination von PV-Anlagen und Landwirtschaft auf derselben Fläche kann dieser Konflikt jedoch gelöst werden (ebd.).

Die Akzeptanz und Verbreitung von APV-Systemen hängt stark von den länderspezifischen Rahmenbedingungen ab. Dazu gehören politische Anreize, regulatorische Vorgaben, technologische Entwicklungen und ökonomische Faktoren (Trommsdorff et al. 2024). Förderprogramme und Einspeisevergütungen können beispielsweise ein wichtiger Anreiz für Landwirte sein, in APV-Systeme zu investieren (Schindele et al. 2020; D'Adamo et al. 2024). Eine Analyse der weltweiten Forschungspublikationen zeigt, dass das Interesse an APV in den letzten Jahren stark zugenommen hat (Soto-Gómez 2024). Die ökonomischen und ökologischen Kosten von APV-Systemen sind mit denen anderer PV-Systeme vergleichbar (Agostini et al. 2021). Die Marktgröße des globalen APV-Sektors wurde auf 6,3 Milliarden US-Dollar im Jahr 2024 geschätzt (Global Market Insights Inc. 2025b). Diese Schätzung spiegelt die zunehmende Integration von PV-Anlagen in landwirtschaftlich genutzte Flächen wider.

In Südkorea beispielsweise stellt die begrenzte Landfläche eine große Herausforderung für den Ausbau erneuerbarer Energien dar (Jo et al. 2024; Park und Kim 2025). Hier werden zunehmend PV-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen

installiert, um die Effizienz der Landnutzung zu erhöhen und gleichzeitig Strom und landwirtschaftliche Produkte zu erzeugen (Jo et al. 2024). Die Integration von PV in die Landwirtschaft ermöglicht es Ländern mit Landmangel, ihre begrenzten Ressourcen optimal zu nutzen (Kim et al. 2021). Auch in Taiwan wurde ein Erneuerbare-Energien-Gesetz verabschiedet, das den Ausbau der PV fördert und die gleichzeitige Nutzung landwirtschaftlicher Flächen für die Energieerzeugung vorsieht (Tsai et al. 2019).

Die APV wurde vor zwanzig Jahren in Japan unter dem Namen "Solar Sharing" eingeführt (Tajima und Iida 2021). Das erste Pilotprojekt wurde 2004 in Chiba in der Nähe von Tokio installiert (ebd.). Japan war auch das erste Land, das seit 2013 einen gesetzlichen Rahmen geschaffen hat, der die APV auf allen Arten von Ackerland unter bestimmten Bedingungen erlaubt (ebd.). Die APV konnte sich dank großzügiger Einspeisevergütung schnell in 46 der 47 Präfekturen verbreiten (Tajima und Iida 2021; Doedt et al. 2022). Bis März 2022 wurden 4.349 Genehmigungen erteilt und die Zahl der Genehmigungen steigt stetig an (Doedt et al. 2022). In Japan tolerieren Landwirte Ertragseinbußen von bis zu 20 % (Toledo und Scognamiglio 2021). Im Gegenzug erhalten sie Einnahmen aus dem Stromverkauf (Tajima und Iida 2021).

Weltweit gibt es bereits eine Vielzahl von APV-Projekten, die sich in Größe, Technologie und Anwendung unterscheiden (Zainol Abidin et al. 2021; Chalgynbayeva et al. 2023). In Deutschland, einem der Vorreiter in der APV-Forschung, wurden mehrere Pilotprojekte initiiert, um die Machbarkeit und die Auswirkungen dieser Technologie auf verschiedene Kulturen zu untersuchen. Das Projekt "Klimapark Steinhöfel" in Brandenburg, das sich auf einer Fläche von 500 ha über acht Dörfer erstreckt, positioniert sich als Vorreiter im Bereich der APV und könnte mit einer geplanten Leistung von beachtlichen 753 Megawatt die flächenmäßig größte Anlage dieser Art in Europa werden (Solarserver 2024; agrarheute 2024). Der geplante Baubeginn des zugehörigen Umspannwerks im Jahr 2025 stellt einen wichtigen Meilenstein für die Realisierung dieses ambitionierten Vorhabens dar, dessen vollständige Inbetriebnahme für 2026 geplant ist (ebd.). Die Besonderheit dieser Anlage liegt in der multifunktionalen Nutzung der Flächen unter den PV-Modulen, die sowohl für den Anbau von mehrjährigen Futterpflanzen als auch für die Rinderhaltung vorgesehen sind und somit eine synergetische Verbindung von Energieerzeugung und Landwirtschaft ermöglichen (SPIE 2024).

Auch in den USA gibt es eine wachsende Zahl von PV-Projekten in der Landwirtschaft, vor allem in den westlichen Bundesstaaten, wo die Sonneneinstrahlung hoch ist und die Landwirtschaft eine wichtige Rolle spielt (Warmann et al. 2024). Der APV-Markt in den USA verzeichnet in den Jahren 2022, 2023 und 2024 ein signifikantes Wachstum auf 680 Millionen US-Dollar, 720 Millionen US-Dollar bzw. 770 Millionen US-Dollar (Global Market Insights Inc. 2025b).

Die APV gewinnt in verschiedenen Ländern Afrikas an Bedeutung, da sie das Potenzial bietet, die Herausforderungen der Energie-, Wasser- und Ernährungssicherheit gleichzeitig anzugehen (Favi et al. 2024). Aktuelle Projekte in Marokko, wie das von Französischer Globaler Umweltfonds (Fonds Français pour l'Environnement Mondial, FFEM) unterstützte Avocado Anbauprojekt und das SmartAPV-Fruit Projekt für den Beerenanbau, untersuchen die Anpassung und Optimierung von APV-Systemen an lokale Bedingungen (ANR 2022; FFEM 2025). Darüber hinaus zeigt die Partnerschaft zwischen der Internationale Finanz-Corporation (IFC), einer marokkanischen Bank und einem Bewässerungsunternehmen das wachsende Interesse an der Finanzierung von solarbetriebenen Bewässerungssystemen, die eine Schlüsselkomponente von APV-Systemen darstellen (IFC 2023). Neben den bereits erwähnten Projekten in Marokko gibt es auch Initiativen in Ostafrika, wie z.B. Pilotprojekte in Kenia, Uganda und Tansania, die vielversprechenden Ergebnisse in Bezug auf verbesserte Ernteerträge und Wassereinsparungen durch die Kombination von Landwirtschaft und Solarstromerzeugung zeigen (Abbildung 18) (Randle-Boggis et al. 2021). Darüber hinaus zielt das Projekt APV-MaGa in Mali und Gambia auf die Entwicklung nachhaltiger Systeme für die Produktion von Nahrungsmitteln, Energie und Wasser ab (Fraunhofer ISE o. J.). Diese frühen Bemühungen verdeutlichen das wachsende Interesse und die vielfältigen Ansätze, APV in verschiedenen agrarökologischen Zonen Afrikas einzusetzen, um sowohl die landwirtschaftliche Produktivität zu steigern als auch einen Beitrag zur Erzeugung erneuerbarer Energien zu leisten (MacDonald et al. 2022).



Abbildung 18: APV-Testsysteme in Kenia und Tanzania (links: Latia Agri-business Centre, Kenia; rechts: Sustainable Agriculture Tanzania) (Cinderby et al. 2024).

Die Abgrenzung einer APV-Anlage von konventionellen Freiflächenanlagen und ihre Einordnung in das Spektrum der APV erfolgt anhand verschiedener Schlüsselerkriterien, die sowohl die landwirtschaftliche Nutzung als auch die Systemintegration berücksichtigen (Willockx et al. 2020b; Trommsdorff et al. 2024). Ein wesentlicher Aspekt ist die Nutzung, die sich in der landwirtschaftlichen Produktion oder in der Tierhaltung manifestieren kann (Trommsdorff et al. 2024). Diese Unterscheidung ist wichtig, da sie die Auswahl der Kulturen, die Anordnung der Solarmodule und die Bewirtschaftungspraktiken beeinflusst (ebd.). Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Art des Systems, wobei zwischen offenen Systemen, die direkte Sonneneinstrahlung und natürliche Belüftung ermöglichen, und geschlossenen Systemen wie Gewächshäusern mit integrierter PV-Technologie unterschieden wird (Toledo und Scognamiglio 2021; Cossu et al. 2023). Die architektonische Gestaltung der PV-Anlage ist ein weiterer Faktor, der die Klassifizierung beeinflusst (Assiene Mouodo et al. 2024; Soto-Gómez 2024). Hier spielen die Aufständerungshöhe, die Ausrichtung der Module (vertikal oder horizontal) und die Integration in bestehende landwirtschaftliche Strukturen eine Rolle (ebd.).

Die landwirtschaftliche Nutzungsform wie Gartenbau, Ackerbau, Obstbau oder Dauergrünland prägt die Anforderungen an die APV-Anlage (Agostini et al. 2021; Zahrawi und Aly 2024). Darüber hinaus ist die Flexibilität der Anlage von Bedeutung, die sich in mobilen oder stationären Anlagen sowie in der Möglichkeit einer pflanzen- oder energieoptimierten Nachführung äußern kann (ebd.). Bei der

Planung einer APV-Anlage sind verschiedene Grundsätze zu beachten, die eine erfolgreiche Integration von Landwirtschaft und Energieerzeugung gewährleisten (Trommsdorff et al. 2024). Von zentraler Bedeutung ist die Auswahl geeigneter Nutzpflanzen unter Berücksichtigung von Lichtverhältnissen, Bodenbeschaffenheit und Bewässerungsbedarf (Toledo und Scognamiglio 2021; Trommsdorff et al. 2024). Die Lichtverteilung unter den Solarmodulen muss so gestaltet sein, dass ein ausreichendes Pflanzenwachstum gewährleistet ist (Toledo und Scognamiglio 2021). Dies erfordert eine sorgfältige Planung der Modulanordnung und der Aufständerrhöhe (ebd.). Die Aufständerrung und Fundamentierung der Anlage muss sowohl den landwirtschaftlichen als auch den statischen Anforderungen genügen (Lee et al. 2023; Trommsdorff et al. 2024). Bei der Auswahl der Solarmodule sollten die spezifischen Anforderungen der landwirtschaftlichen Nutzung, wie z.B. Lichtdurchlässigkeit und Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse, berücksichtigt werden (ebd.). Die Vorteile von APV-Anlagen für die Landwirtschaft sind vielfältig. Dazu gehören die Reduzierung der Windgeschwindigkeit, die Erhöhung der Bodenfeuchte, die Minimierung von Flächenverlusten durch Doppelnutzung und die Möglichkeit der RWH (Jain et al. 2021; Wydra et al. 2022). Zudem kann es zu einer saisonalen Verschiebung der Ernte kommen, was sich positiv auf die Vermarktung der Produkte auswirken kann (Trommsdorff et al. 2024).

Die Auswahl geeigneter Pflanzenkulturen kann auch dazu beitragen, die Modultemperatur zu senken und damit die Effizienz der Energieerzeugung zu erhöhen (Carlos Pérez Mejía et al. 2023; Bourisli et al. 2024). Grundsätzlich eignen sich alle Kulturpflanzen für den Anbau unter einer APV-Anlage, wobei aufgrund der Beschattung unterschiedliche Auswirkungen auf den Ertrag zu erwarten sind (Trommsdorff et al. 2024). Die Leistung von APV-Anlagen kann optimiert werden, indem die direkte Sonneneinstrahlung während der gesamten Vegetationsperiode um maximal 50 % reduziert wird (Schindele et al. 2020). Die Integration von Solartechnologien reduziert den Kraftstoffverbrauch und ermöglicht die Entwicklung nachhaltigerer und flexiblerer Technologien (Rech et al. 2018; Pierri et al. 2021). Die APV-Technologie kann die Widerstandsfähigkeit landwirtschaftlicher Betriebe durch Diversifizierung der Einkommensquellen erhöhen (Wagner et al. 2024).

4.2 Stand der Technik APV-Freiland

Die APV umfasst verschiedene Kategorien der Integration von PV-Anlagen in landwirtschaftlich genutzte Flächen (Willockx et al. 2020b). Dazu gehören APV-Systeme, die auf Ackerflächen zur gleichzeitigen Stromerzeugung und Pflanzenproduktion errichtet werden, sowie die sogenannte Weidephotovoltaik ("Rangevoltatics"), bei der Solaranlagen auf Weideflächen zur Nutzung als Weideland und zur Energieerzeugung kombiniert werden (Abbildung 19) (ebd.). Weiterhin wird unterschieden zwischen PV in offenen Systemen (Freiflächen-Photovoltaik, PV-FFA), also Freiflächenanlagen in Kombination mit Landwirtschaft, und geschlossenen Systemen (Gewächshaus-PV), bei denen PV-Module in oder auf Gewächshäusern integriert werden, um sowohl das Pflanzenwachstum unter kontrollierten Bedingungen zu ermöglichen als auch erneuerbare Energie zu erzeugen (ebd.).

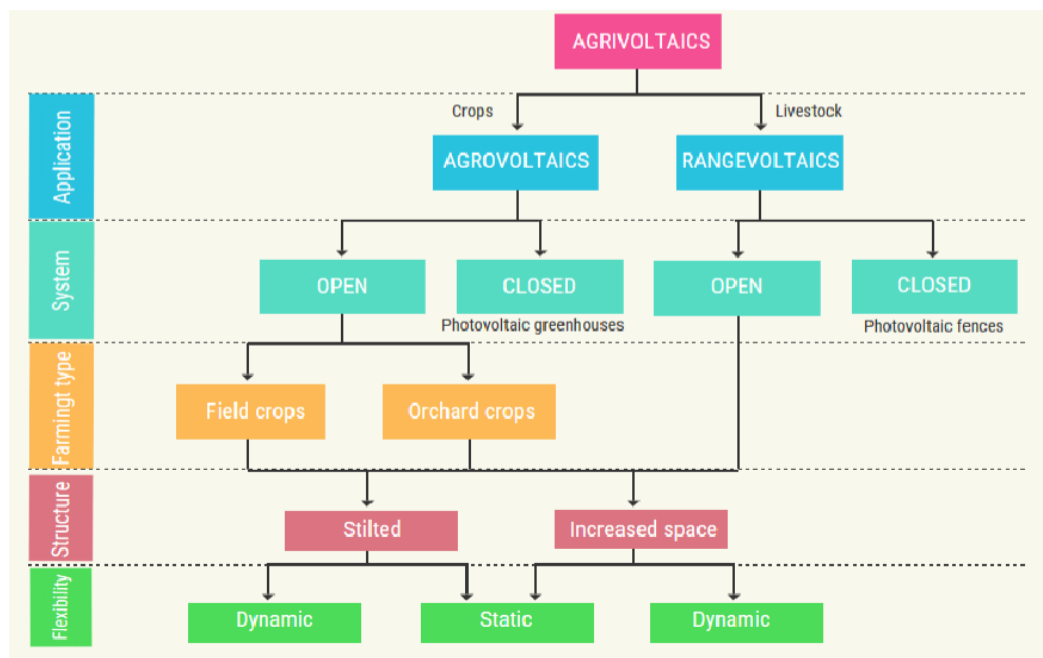
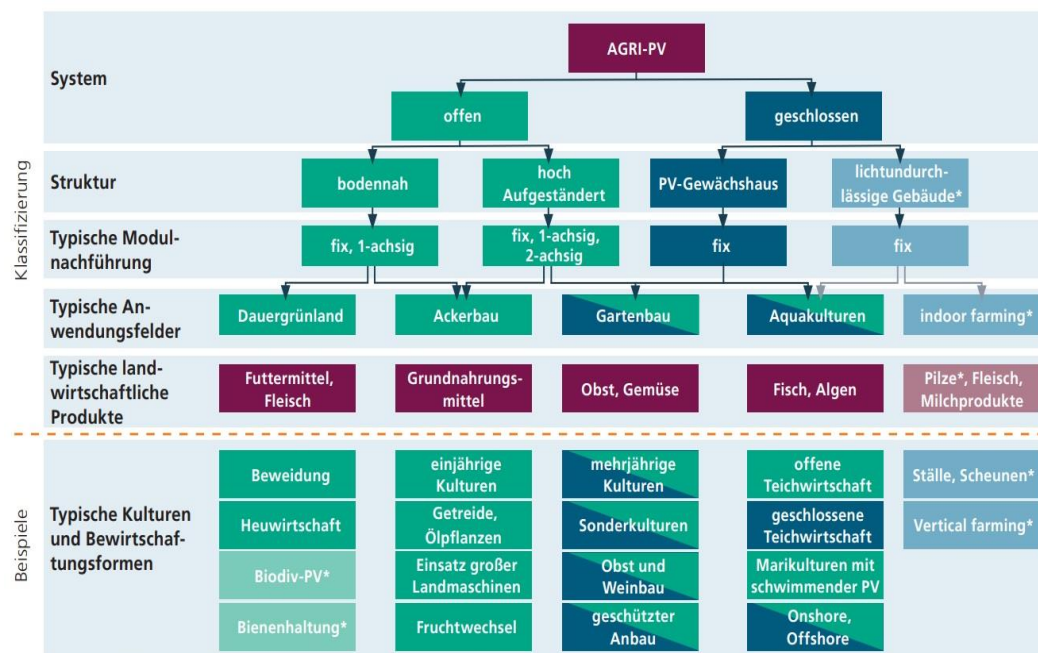


Abbildung 19: Klassifizierung von APV -Anlagen (Willockx et al. 2020b).

Die technologischen Aspekte von APV- Freilandanlagen umfassen eine Vielzahl von Designüberlegungen, die auf die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Kulturen und Standorte abgestimmt sind (Lee et al. 2023). Dazu gehören die Auswahl geeigneter Solarmodule, die Anordnung der Module, die Höhe der Aufständerung und die Ausrichtung der Anlage, um ein optimales Gleichgewicht zwischen der Sonneneinstrahlung auf die Pflanzen und der Energieerzeugung zu gewährleisten (Toledo und Scognamiglio 2021; Asa'a et al. 2024). Als besonders vielversprechend haben sich bifaziale Solarmodule erwiesen, die das Licht von beiden Seiten einfangen und durch die Nutzung des diffusen Lichts und der Reflexionen

von der Bodenoberfläche die Stromproduktion um bis zu 50 % gegenüber monofazialen Modulen steigern können (Cuevas et al. 1982; Ernst et al. 2024).

Die Höhe der Aufständering ist ein entscheidender Faktor, der die landwirtschaftliche Nutzung unter den Modulen beeinflusst, eine Höhe von mindestens 2,1 Metern ermöglicht den Einsatz von landwirtschaftlichen Maschinen und eine effiziente Bewirtschaftung der Fläche (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021; Trommsdorff et al. 2024). Darüber hinaus ermöglichen nachgeführte PV-Systeme eine Optimierung der Lichtverfügbarkeit für die Kulturpflanzen (Trommsdorff et al. 2024). Unterkonstruktion und Fundament müssen so ausgelegt sein, dass sie den Belastungen durch Wind, Schnee und landwirtschaftliche Aktivitäten standhalten (ebd.). Ein durchdachtes Licht- und Wassermanagement ist entscheidend für ausreichend hohe und gleichmäßige Erträge (ebd.).



*Keine Agri-PV-Anwendung im engeren Sinne

Abbildung 20: Klassifikation verschiedener Agri-PV-Anwendungen. APV-Systeme zeichnen sich durch eine große Kombination möglicher technischer PV-Lösungen (Modultypen, Montagestrukturen etc.) und unterschiedlicher Flächennutzungen (wie Grünlandwirtschaft, Ackerbau etc.) aus (Fraunhofer ISE 2024a).

Auf Basis bestehender Klassifikationssysteme kann eine Differenzierung der Aufständeringstechnik vorgenommen werden. Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) hat in diesem Zusammenhang eine Systematisierung von APV-Anlagen vorgenommen, die eine Unterscheidung in offene

Systeme (PV-FFA) und geschlossene Systeme (Gewächshaus-Photovoltaik) vorsieht (Abbildung 20) (Willockx et al. 2020b; Fraunhofer ISE 2024a).

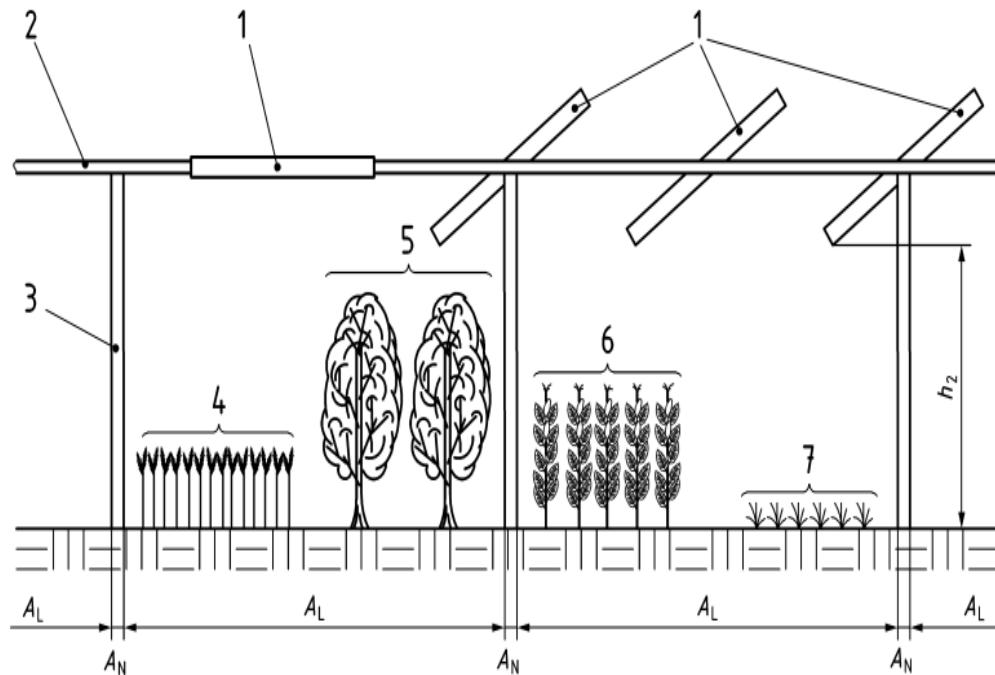
Der aktuelle Stand der Technik umfasst verschiedene Anlagenkonzepte, die je nach Standort, Kultur und Bewirtschaftungsform eingesetzt werden können. Die wichtigsten APV-Anlagentypen sind:

4.3 Aufständering

Die DIN SPEC 91434 definiert einen Rahmen für APV-Anlagen und unterteilt diese in zwei Hauptkategorien, die sich hinsichtlich ihrer Bauweise, Flächennutzung und landwirtschaftlichen Integration unterscheiden:

4.3.1 Hoch aufgeständerte APV-Anlagen / Kategorie I

Die Kategorie I der DIN SPEC 91434 umfasst APV-Anlagen mit einer signifikanten lichten Höhe, die in der Regel mindestens 2,10 m beträgt (Abbildung 21) (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021). Diese Bauweise ermöglicht die ungehinderte Fortsetzung der landwirtschaftlichen Nutzung unterhalb der Solarmodule (ebd.). Die erhöhte Anordnung der Solarmodule bietet den Vorteil, dass landwirtschaftliche Maschinen problemlos eingesetzt werden können und eine effiziente Bewirtschaftung der Fläche gewährleistet ist (Trommsdorff et al. 2024). Die freie Höhe der Module ist ein wichtiger Designparameter, da höhere Strukturen die Homogenität der Strahlungsverfügbarkeit unter den PV-Modulen bestimmen, die Konnektivität verbessern und die Verwendung von hohen Pflanzen ermöglichen können (Toledo und Scognamiglio 2021). Anlagen der Kategorie I zeichnen sich durch einen geringen Flächenverlust von maximal 10 % aus (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021). Gleichzeitig muss der landwirtschaftliche Ertrag mindestens 66 % des Referenzertrags betragen, um die Anforderungen der DIN SPEC 91434 zu erfüllen (ebd.). Diese Kategorie soll die Integration von Solarenergie in bestehende landwirtschaftliche Betriebe fördern, ohne die landwirtschaftliche Produktion wesentlich zu beeinträchtigen (ebd.).



Legende

- A_L landwirtschaftlich nutzbare Fläche
- A_N landwirtschaftlich nicht nutzbare Fläche
- h_2 lichte Höhe über 2,10 m
- 1 Beispiele zu Solarmodulen
- 2 Verstrebung
- 3 Aufständering
- 4 bis 7 Beispiele landwirtschaftlicher Kulturen

Abbildung 21: Darstellung APV Anlage Kategorie I nach DIN SPEC 91434:2021-05 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021).

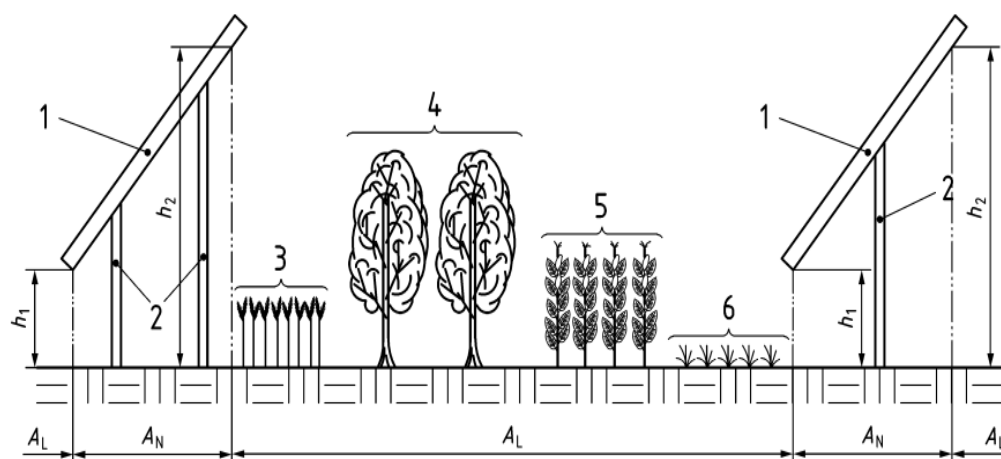
Zu den agronomischen Vorteilen von hoch aufgeständerten Systemen zählen eine verbesserte Luftzirkulation unter den Modulen, eine homogenere Lichtverteilung sowie die Kompatibilität mit gängigen landwirtschaftlichen Maschinen (Sarr et al. 2023; Gong et al. 2025). Derzeitige Anwendungen von hoch aufgeständerten Systemen konzentrieren sich hauptsächlich auf höher wachsende Kulturen wie Obstbäume und bestimmte Gemüsearten, insbesondere in Regionen mit mechanisierten Anbaumethoden, die einen entsprechenden Geräteabstand erfordern (Xiao et al. 2022; Rösch und Fakharizadehshirazi 2024). Aber auch im Ackerbau sind APV-Systeme bereits zu finden (Abbildung 22).



Abbildung 22: Hoch aufgeständerte APV-Anlage. Die Module sind etwa fünf Meter über dem Ackerboden montiert, so dass der Mähdrescher darunter durchfahren kann. Diese Konstruktion ermöglicht eine vollwertige maschinelle Bewirtschaftung der Fläche. (Fraunhofer ISE 2016).

4.3.2 Bodennahe Anlage / Kategorie II

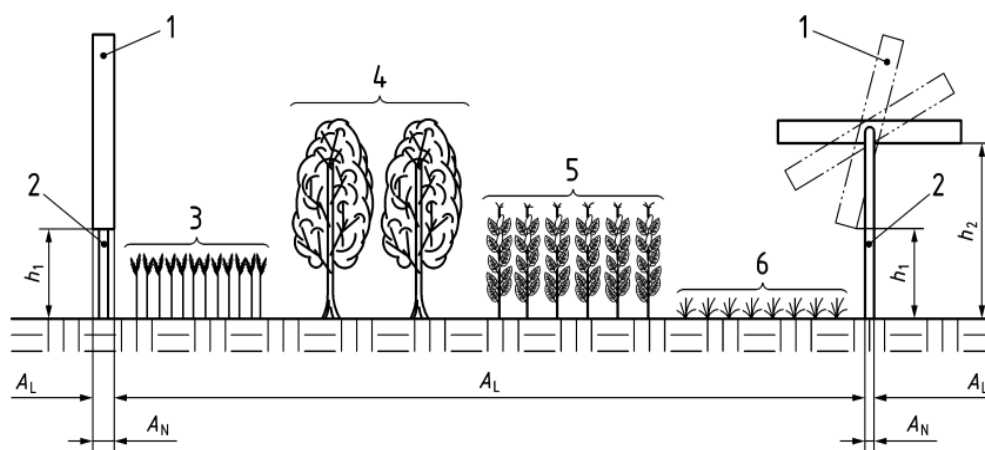
Die Kategorie II der DIN SPEC 91434 bezieht sich auf APV-Anlagen mit bodennahe Aufständigung, bei denen die landwirtschaftliche Bearbeitung zwischen den Reihen der Solarmodule erfolgt (Abbildung 23, Abbildung 24, Abbildung 25) (Trommsdorff et al. 2024; Deutsches Institut für Normung e.V. 2021). Anlagen der Kategorie II zeichnen sich durch einen etwas höheren Flächenverlust von maximal 15 % aus, der jedoch durch die optimierte Nutzung der verbleibenden Fläche kompensiert wird (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021). Auch hier gilt die Bedingung, dass der landwirtschaftliche Ertrag mindestens 66 % des Referenzertrages erreichen muss (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021). Die bodennahen Anlagen eignen sich besonders für Kulturen, die eine geringere Wuchshöhe aufweisen oder von der Beschattung durch die Solarmodule profitieren (Hernandez et al. 2019; Trommsdorff et al. 2024).



Legende

- A_L landwirtschaftlich nutzbare Fläche
- A_N landwirtschaftlich nicht nutzbare Fläche
- h_1 lichte Höhe unter 2,10 m
- h_2 lichte Höhe über 2,10 m
- 1 Beispiele zu Solarmodulen
- 2 Aufständering
- 3 bis 6 Beispiele landwirtschaftlicher Kulturen

Abbildung 23: Darstellung APV Anlage Kategorie II Variante 1 nach DIN SPEC 91434:2021-05 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021).



Legende

- A_L landwirtschaftlich nutzbare Fläche
- A_N landwirtschaftlich nicht nutzbare Fläche
- h_1 lichte Höhe unter 2,10 m
- h_2 lichte Höhe über 2,10 m
- 1 Beispiele zu Solarmodulen
- 2 Aufständering;
- 3 bis 6 Beispiele landwirtschaftlicher Kulturen

Abbildung 24: Darstellung APV Anlage Kategorie II Variante 2 nach DIN SPEC 91434:2021-05 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021)

Die Leistung von PV-Anlagen kann durch hohe Zelltemperaturen, Verschmutzung, Fehlanpassungen und andere systembedingte Verluste beeinträchtigt werden (Wurster und Schubert 2014; Hashemi et al. 2021; Tawalbeh et al. 2021; Ebhota und Tabakov 2023; Sepúlveda-Oviedo 2025). Die Verschattung durch PV-Module kann die Wachstumsbedingungen von Pflanzen beeinflussen, indem sie die Menge des verfügbaren Sonnenlichts reduziert (Touil et al. 2021; Hickey et al. 2024). Landwirte können je nach Bedarf zwischen fest installierten und nachgeführten Systemen wählen. Nachgeführte Systeme können so eingestellt werden, dass die Sonneneinstrahlung optimiert und die Beschattung der Pflanzen verbessert wird (Bruno et al. 2025).



Abbildung 25: Bodennahe APV-Anlage im Ackerbau (links). Vertikale APV-Anlage im Ackerbau (rechts). Diese Systeme zeichnen sich durch vereinfachte Tragstrukturen mit reduzierten Materialkosten und geringeren Windlastberechnungen im Vergleich zu hoch aufgeständerten Systemen aus (Zahrawi und Aly 2024).

4.3.3 Tracking-Systeme (Nachführsysteme)

Nachführende APV-Systeme stellen den neuesten Stand der Technik dar und integrieren Bewegungsmechanismen, um sowohl die Energieerzeugung als auch die Pflanzenproduktion zu optimieren (Berrian et al. 2025). Die einachsige Nachführung, die eine Ost-West-Rotation ermöglicht, um dem täglichen Lauf der Sonne zu folgen, ist die am weitesten verbreitete Umsetzung (Abbildung 26) (Galleani D'agliano 2024). Zweiachsige Nachführung, eine aufkommende Technologie, die sowohl horizontale als auch vertikale Anpassungen der Paneele ermöglicht,

maximiert die Energieaufnahme und bietet gleichzeitig programmierbare Beschattungsmuster für Nutzpflanzen (Jensen et al. 2022; Lu und Ajay 2024). Einige Systeme verfügen über manuelle oder automatisierte saisonale Neigungseinstellungen, um die Energieproduktion im Winter und die Beschattung der Pflanzen im Sommer zu optimieren, während fortgeschrittene Systeme die Nachföhrbewegungen mit den Wachstumsstadien der Pflanzen koordinieren, um eine erhöhte Lichteinstrahlung in kritischen Entwicklungsphasen zu gewährleisten (Moretti und Marucci 2019; Sarr et al. 2023). Die Marktdurchdringung von Nachföhrsystemen liegt derzeit bei etwa 15 % der Neuinstallationen, wobei aufgrund sinkender Kosten und weiterentwickelter Steuerungssysteme ein rasches Wachstum prognostiziert wird (Global Market Insights Inc 2025a).



Abbildung 26: APV-Anlage mit einem Tracking-System. Die PV-Module der nachgeführten PV-Anlage der Zimmermann Tracker GmbH auf dem Outdoor Performance Testfeld des Fraunhofer ISE in Merdingen. Tracker sind für die landwirtschaftliche Nutzung zwischen den Modulreihen niedrig aufgeständert (Fraunhofer ISE 2024a).

Nachföhrsysteme in APV-Anlagen bieten deutliche Vorteile gegenüber fest installierten Freiflächenanlagen. Studien zeigen, dass durch den Einsatz von Nachföhrsystemen der Energieertrag um 30 bis 45 Prozent gesteigert werden kann (Hammad et al. 2017; Jamroen et al. 2021). Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist die optimierte Verteilung des Stromertrags über den Tag, was zu einer flacheren und breiteren Ertragskurve föhrt (Bruno et al. 2025). Dies ermöglicht eine höhere Energieeinspeisung in den Morgen- und Abendstunden, in denen die Verfügbarkeit

von PV-Strom oft geringer ist und somit ein höherer Wert für das Stromnetz generiert wird (Musa et al. 2023; Alemayehu und Admasu 2023). Zusätzlich erleichtern nachgeführte Systeme das landwirtschaftliche Management, da die Neigung der Module angepasst werden kann, um beispielsweise die Zugänglichkeit für landwirtschaftliche Maschinen zu optimieren oder die Beschattung der Pflanzen während bestimmter Wachstumsphasen zu minimieren (top agrar 2023; Fraunhofer ISE 2024b). Die Möglichkeit, die Sonneneinstrahlung auf die Pflanzen durch die Steuerung der Modulneigung zu regulieren, kann somit das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen positiv beeinflussen (Sarr et al. 2023).

4.3.4 Seilaufhängungssysteme

Ein vielversprechender Ansatz in der APV ist die Verwendung von Seilaufhängungssystemen, die eine flexible und effiziente Installation von Solarmodulen über landwirtschaftlichen Flächen ermöglichen. Diese Systeme bieten eine Reihe von Vorteilen gegenüber herkömmlichen Montagesystemen, darunter eine bessere Flächennutzung, eine bessere Lichtverteilung für die darunter liegenden Pflanzen und eine einfachere Anpassung an unterschiedliche Geländebedingungen (Abbildung 27) (Leitner und Czaloun 2018). Seilaufhängungssysteme nutzen die Tragfähigkeit von Seilen, die zwischen stabilen Verankerungspunkten befestigt sind, um die Solarmodule in einer bestimmten Höhe über dem Boden zu positionieren (ebd.).

Seilnetzkonstruktionen, bei denen leichte Module an hochfesten Seilen aufgehängt sind, reduzieren die bodennahe Infrastruktur und verbessern die landwirtschaftliche Zugänglichkeit, während modulare Rahmenkonstruktionen eine Anpassung an spezifische Kulturanforderungen und Feldbedingungen ermöglichen (ebd.). Multifunktionale Tragkonstruktionen, die Regenwassernutzung, Rankhilfen für Pflanzen oder die Integration von Sensorik ermöglichen, sind ein weiteres aktives Entwicklungsfeld(ebd.).



Abbildung 27: Seilaufhängung im Rahmen des APV-Projekts „HyPERFarm“ in Straßkirchen (Krinner Carport GmbH 2022).

4.3.5 Holzaufständering

Ein weiteres Innovationspotenzial liegt in der Verwendung von Holz anstelle von Stahl als Material für die Tragstruktur. Durch die Substitution des energie- und ressourcenintensiven Werkstoffs Stahl kann sowohl der ökologische Fußabdruck der Anlage als auch ihr technisch-industrielles Erscheinungsbild reduziert werden (Abbildung 28) (Wydra et al. 2022). Entsprechend vorbehandelte und auf Langlebigkeit ausgelegte Holzstützkonstruktionen, ggf. in Kombination mit im Boden verankerten Spinnankersockeln, können eingesetzt werden (ebd.).



Abbildung 28: APV-Anlage mit tragender Unterkonstruktion aus behandeltem Holz (Marrou 2019).

4.3.6 Faltdachsysteme

Bei diesen Systemen handelt es sich um Modulkonstruktionen, die bei Bedarf geöffnet und geschlossen werden können, um z.B. Pflanzen vor extremen Wetterereignissen wie Hagel oder Starkregen zu schützen (Abbildung 29) (Wydra et al. 2022). Das Faltdachsystem wird ebenfalls mit Drahtseilen oder Stahlseilen abgehängt, so dass Fundamentabstände von bis zu 40 Metern möglich sind (ebd.). Durch den Einsatz von Abstandhaltern ist das System ideal für APV-Anlagen geeignet und ermöglicht ein reihenweises Einfahren, was ein optimales Lichtmanagement unterstützt (ebd.). Zudem kann Regenwasser aufgefangen werden und Reinigungs- und Feldarbeiten werden deutlich erleichtert (ebd.).

Das Schweizer Unternehmen DHP Technology bietet mit dem Horizon-System ein innovatives, faltbares Solardach an (dhp technology AG o. J.). Es wird an Seilkonstruktionen aufgehängt und ermöglicht Spannweiten von bis zu 100 Metern (ebd.). Das Dach lässt sich automatisch ein- und ausfahren, ermöglicht die Nutzung von Regenwasser und erleichtert durch seine flexible Konstruktion Wartungs- und Feldarbeiten (ebd.).



Abbildung 29: Innovatives faltbares Solardach-System (Horizon-System) der DHP Technology (Schweiz) (dhp technology AG o. J.).

4.3.7 Innovative Ansätze

Eine aktuelle Innovation ist die Integration von leichten Solarmodulen in bestehende Hagelschutzkonstruktionen im Obstbau. Das Fraunhofer ISE hat zusammen mit der Firma VOEN Vöhringer aus Fronreute eine kostengünstige Alternative zu herkömmlichen APV-Anlagen entwickelt (Abbildung 30) (Fraunhofer ISE 2025). Anstelle von teuren Stahlkonstruktionen können z.B. bestehende Hagelnetze als Tragsystem verwendet werden, was die Installationskosten erheblich reduziert (ebd.). Die Verwendung von besonders leichten Solarmodulen ist dabei essenziell, um die bestehende Tragkonstruktion nicht zu überlasten (ebd.). Ein weiterer Vorteil dieser Integration ist der zusätzliche Schutz der darunter liegenden Kulturen vor extremen Wetterereignissen wie Hitze und Hagel (ebd.). Darüber hinaus bietet das System die Möglichkeit, vorhandene Schutznetze (z.B. Hagelnetze) bei Bedarf unter den Solarmodulen zu verstauen und somit flexibel weiter zu nutzen (ebd.).



Abbildung 30: Leichte PV-Module. Das Fraunhofer ISE und die Firma VOEN Vöh-ringer GmbH & Co. KG haben besonders leichte PV-Module entwickelt, die sich problemlos auf gängigen Wetterschutzsystemen für Sonderkulturen installieren lassen (Fraunhofer ISE 2025).

4.4 Module

4.4.1 Semitransparente Module

Semitransparente PV-Module bieten den großen Vorteil einer erhöhten Lichtdurchlässigkeit, was zu einer verbesserten PAR für die darunter wachsenden Pflanzen führt (Trommsdorff et al. 2021). Diese Module zeichnen sich durch eine spezielle Konstruktion aus, bei der sowohl die Vorder- als auch die Rückseite aus transparentem Glas oder lichtdurchlässiger Folie besteht, wodurch Licht zwischen den einzelnen Photovoltaikzellen hindurchtreten kann (Patel et al. 2019; Hopf 2021). Im Gegensatz zu konventionellen PV-Modulen sind die Solarzellen in semitransparenten Modulen in größeren Abständen zueinander angeordnet, wodurch die Lichtdurchlässigkeit deutlich verbessert wird (Lu und Law 2013). Anstelle der üblichen Aluminiumrahmen oder Metallrahmen werden bei diesen Modulen häufig spezielle Klemmhalterungen verwendet, um die Transparenz zu maximieren und Verschattungseffekte zu minimieren (Hörnle et al. 2021). Bei herkömmlichen PV-Modulen beträgt der Flächenanteil der Zwischenräume nur vier bis fünf Prozent

der Gesamtfläche (Trommsdorff et al. 2021). Durch die gezielte Vergrößerung dieser Abstände bei semitransparenten Modulen wird nicht nur eine größere Fläche geschaffen, die die Pflanzen vor extremen Witterungseinflüssen schützt, sondern auch eine deutlich höhere Lichtdurchlässigkeit ermöglicht (Trommsdorff et al. 2021; Hopf 2021). Ein weiterer Vorteil dieser Konfiguration ist, dass das transmittierte Licht in diffuses Licht umgewandelt wird, was für viele Kulturpflanzen von Vorteil sein kann, da es zu einer gleichmäßigeren Lichtverteilung führt und die Photoinhibition reduziert (Detweiler et al. 2015).

4.4.2 Bifaziale Module

Bifaziale Solarmodule sind eine innovative Weiterentwicklung der PV-Technologie, die es ermöglicht, Sonnenlicht sowohl auf der Vorder- als auch auf der Rückseite des Moduls zu absorbieren und in elektrische Energie umzuwandeln (Zhong et al. 2023). Diese Technologie nutzt die Tatsache, dass ein erheblicher Teil des Sonnenlichts, das auf die Modulumgebung trifft, reflektiert oder gestreut wird und so die Rückseite des Moduls erreicht (Guerrero-Lemus et al. 2016). Die Besonderheit der bifazialen Module liegt in ihrer Fähigkeit, diese diffuse oder reflektierte Strahlung auf der Rückseite zu nutzen und so die Gesamtenergieerzeugung im Vergleich zu herkömmlichen monofazialen Modulen zu erhöhen (Yun et al. 2022). Die Rückseite kann bis zu 85 % der Leistung der Vorderseite erreichen (Ding et al. 2019; Next2Sun GmbH 2021). Bifaziale Module haben das Potenzial, den Energieertrag von PV-Anlagen um 5 bis 25 Prozent zu steigern (Dullweber und Schmidt 2016). Bifaziale Module spielen im Kontext der APV eine besondere Rolle, da die Aufständigung der Module in APV-Systemen typischerweise so gestaltet ist, dass die Rückseite der Module eine erhöhte Lichteinstrahlung erfährt (Trommsdorff et al. 2021; Soto-Gómez 2024; Galleani D'agliano 2024). Darüber hinaus begünstigt die beidseitige Verglasung bifazialer Module eine homogenere Lichtverteilung unterhalb der Anlage, was sich positiv auf das Pflanzenwachstum auswirken kann (Willockx et al. 2020a).

4.4.3 Dünnschichtmodule

Die Dünnschicht-Photovoltaik-Technologie bietet spezifische Vorteile für APV-Anwendungen, einschließlich der Flexibilität in Bezug auf den Formfaktor, was maßgeschneiderte Designs für die spezifischen Anforderungen der Landwirtschaft ermöglicht (Maalouf et al. 2023; Asa'a et al. 2024). Aufgrund ihrer mechanischen

Flexibilität und ihres potenziell geringen Gewichts sind sie eine interessante Alternative zu herkömmlichen, starren Siliziumzellen (Batmunkh 2020; Maalouf et al. 2023; Asa'a et al. 2024). Diese Module zeichnen sich durch ihre Anpassungsfähigkeit an verschiedenste Oberflächen und Formen aus, wodurch neue Anwendungsbereiche erschlossen werden, die mit starren Modulen nicht realisierbar wären (Hermes et al. 2015). Obwohl Zellwirkungsgrade von bis zu 20,4 % erreicht wurden, liegen diese noch unter denen herkömmlicher Siliziumzellen (Kim et al. 2021). Die Materialwahl beeinflusst die Effizienz, Lebensdauer und Anpassungsfähigkeit flexibler Solarmodule (ebd.). Je nach Grad der Biegsamkeit werden flexible und semiflexible Typen unterschieden, wobei die Materialdicke eine entscheidende Rolle für das Gewicht und die Einsatzmöglichkeiten spielt (Noman et al. 2024). Flexible Solarmodule sind aufgrund ihrer geringen Materialstärke sehr leicht und bieten vielfältige Einsatzmöglichkeiten (Noman et al. 2024). Ein Vorteil der Dünnschichttechnologie liegt in der Reduktion der Materialkosten, da anstelle von massivem Silizium dünne Schichten aufgebracht werden (Garg et al. 2024). Dieser Kostenvorteil kann jedoch teilweise durch eine geringere Effizienz bei der Stromerzeugung kompensiert werden (Lin et al. 2016; Dallaev et al. 2023). Die Entwicklung flexibler Solarmodule zielt darauf ab, Materialien mit hoher Lichtabsorption und Flexibilität zu verwenden, die eine Abscheidung auf dünnen Kunststoffsubstraten bei niedrigen Temperaturen ermöglichen (Lin et al. 2016; Dallaev et al. 2023).

4.4.4 Leichte Module

Leichtbau-Solarmodule stellen eine innovative Weiterentwicklung in der PV-Technologie dar, die darauf abzielt, das Gewicht herkömmlicher Solarmodule deutlich zu reduzieren, typischerweise um bis zu 70 % (Kaltenbrunner et al. 2012; Gören 2017). Erreicht wird dies durch den Ersatz von Glas auf der Vorder- und Rückseite durch leichtere Materialien wie glasfaserverstärkte Kunststoffe und den Ersatz von Metallrahmen durch z.B. Klemmhalterungen (ebd.). Trotz der Gewichtsreduktion halten diese Module durch die Verstärkung der Vorder- und Rückseite hohen Schnee- und Windlasten stand (Saravanapavanantham et al. 2023). Dies führt nicht nur zu Einsparungen bei Transport und Installation, sondern auch zu einem geringeren Materialeinsatz bei der Aufständigung (Batmunkh 2020). Leichte Module mit einer Leistung von bis zu 430 W bieten eine hohe Effizienz und eröffnen neue Möglichkeiten für die Integration von Solarenergie in Bereichen, in denen schwere, traditionelle Module nicht praktikabel sind, z. B. in tragbaren

elektronischen Geräten oder auf unkonventionellen Gebäudeoberflächen (Li et al. 2021; Zhang et al. 2023b) . Die Umwandlung der Sonnenstrahlung in elektrische Energie erfolgt in Photovoltaikzellen, die in Modulen zusammengefasst sind, wobei ein typisches Modul eine Leistung von etwa 160-200 Wp hat (Ahmed 2024).

4.4.5 Organische Module

Organische Photovoltaikmodule (OPV) sind eine vielversprechende Technologie für die Integration in landwirtschaftliche Strukturen, insbesondere in Gewächshäusern, da sie eine wellenlängenselektive Transparenz aufweisen, die für das Pflanzenwachstum optimiert werden kann (Emmott et al. 2015). Trotz dieser Vorteile sind organische PV-Module mit Herausforderungen hinsichtlich Skalierbarkeit und Robustheit konfrontiert, da sie empfindlich auf Umwelteinflüsse wie Hitze, Wasser, Sauerstoff und hohe Strahlungsintensität sowie mechanische Belastungen reagieren (Duan und Uddin 2020; Nkinyam et al. 2025). Die begrenzte Lebensdauer und die hohen Kosten im Vergleich zu anderen Energiequellen haben ihren Einsatz bisher eingeschränkt (Magadley et al. 2022). Die Installation von organischen PV-Modulen in Folientunnel-Gewächshäusern hat jedoch gezeigt, dass die Lebensdauer der Module im Vergleich zu Freilandanlagen verlängert werden kann, was auf den Schutz vor schädlichen Umwelteinflüssen wie Staub und rauem Wetter zurückzuführen ist (Friman-Peretz et al. 2020). Dies deutet darauf hin, dass die kontrollierte Umgebung eines Gewächshauses die Leistung und Haltbarkeit von OPV-Modulen verbessern kann, was sie zu einer praktikablen Option für die nachhaltige Energieerzeugung in der Landwirtschaft macht (Magadley et al. 2022).

Zusätzliche Modultechnologien

Neben konventionellen Modulen werden verschiedene innovative Ansätze evaluiert, die spezifische Vorteile für APV-Anwendungen bieten. Weitere Modultechnologien werden ebenfalls für APV-Anwendungen evaluiert. Dazu gehören die im Folgenden Beschriebenen.

4.4.6 Röhrenförmige Module

Die Röhrenmodule der TubeSolar AG bieten durch ihr einzigartiges Design deutliche Vorteile für APV-Anwendungen (Jäger et al. 2022). Ihre offene Struktur ist schnee- und winddurchlässig und reduziert so die strukturelle Belastung im Vergleich zu herkömmlichen, massiven Modulen (ebd.). Dies führt zu einfacheren und kostengünstigeren Montagesystemen (ebd.). Während die Dünnschichtzellen in

den Röhren einen Modulwirkungsgrad von ca. 10 % aufweisen, soll durch die halbzylindrische Form ein um 50 % höherer spezifischer Energieertrag im Vergleich zu flachen Dünnschichtmodulen erreicht werden (ebd.). Allerdings schätzt der Hersteller, dass der Gesamtenergieertrag eines TubeSolar-Moduls mehr als 30 % unter dem eines monokristallinen Flachmoduls liegt (ebd.). Ein weiterer Vorteil liegt in der Fähigkeit der Röhren, die Leistungsspitze zur Mittagszeit zu glätten, was zu einer gleichmäßigeren Stromproduktion über den Tag hinweg führt (ebd.).

4.4.7 Farbige Module

Farbige Module sind eine solche Innovation, die ästhetische und funktionale Vorteile vereint, indem sie spezifische Lichtspektren an die darunter liegenden Nutzpflanzen weiterleitet (Fraunhofer ISE 2023). Diese gezielte Lichttransmission kann das Pflanzenwachstum und die Blütezeitpunkte beeinflussen, wobei hauptsächlich rot und blau gefärbte Module ein vielversprechendes Potenzial aufweisen (Kolur et al. 2024). Es ist jedoch zu beachten, dass die derzeitige farbige Technologie in der Regel einen etwas geringeren Wirkungsgrad aufweist, der etwa 5 bis 15 % unter dem von Standardmodulen liegt (Borja Block et al. 2024).

Farbige Module bieten sowohl ästhetische als auch funktionale Vorteile, da unterschiedliche Farben spezifische Lichtspektren an die darunter liegenden Nutzpflanzen übertragen (Thompson et al. 2020). Insbesondere rot und blau gefärbte Module zeigen ein Potenzial zur Steuerung von Pflanzenwachstumseigenschaften und Blühzeitpunkten, obwohl die derzeitige farbige Technologie typischerweise einen um 5 bis 15 % geringeren Wirkungsgrad im Vergleich zu Standardmodulen aufweist (Thompson et al. 2020; Fraunhofer ISE 2023).

4.4.8 Anti-Reflexbeschichtung der Module

Anti-Reflexbeschichtungen, auch AR-Beschichtungen oder ARC genannt, sind dünne Schichten, die auf die Oberfläche von PV-Modulen aufgetragen werden, um die Reflexion des einfallenden Sonnenlichts zu reduzieren und die Lichtdurchlässigkeit zu erhöhen (Raut et al. 2011). Dadurch wird die Lichtmenge maximiert, die die Solarzellen erreicht und zur Stromerzeugung beiträgt (Raut et al. 2011; Sarkin et al. 2020). Das Prinzip von Antireflexbeschichtungen beruht auf der Interferenz von Lichtwellen (Raut et al. 2011). Eine Beschichtung mit einem bestimmten Brechungsindex wird auf das Modul aufgebracht (Guo et al. 2021). Ziel ist es, dass sich die an der Oberfläche der Beschichtung und an der Grenzfläche zwischen

Beschichtung und Substrat reflektierten Lichtwellen destruktiv überlagern und so die Gesamtreflexion minimieren (Raut et al. 2011). Dadurch erhöht sich die Anzahl der Photonen, die in die Solarzelle eindringen, was letztlich den Wirkungsgrad des Moduls steigert (ebd.). Antireflexbeschichtungen sind vor allem für Siliziumsolarzellen wichtig, da Silizium aufgrund seines hohen Brechungsindex einen großen Teil des einfallenden Lichts reflektieren würde (ebd.).

4.4.9 Konzentrierende Photovoltaik (CPV)

Konzentrierende Photovoltaik CPV (Concentrator PhotoVoltaics) ist eine weitere vielversprechende Technologie für APV-Systeme, die Sonnenenergie auf kleine, hocheffiziente Zellen fokussiert (Fraunhofer ISE 2018). Moderne CPV-Systeme lenken das konzentrierte Licht präzise auf die PV-Zellen, während das restliche Licht diffus auf die darunter liegenden Nutzpflanzen gestreut wird (Liu et al. 2018). Diese Systeme zeichnen sich durch einen hohen Umwandlungswirkungsgrad von 30-40 % bei direkter Sonneneinstrahlung aus (Antonini 2013; Fraunhofer ISE 2018). Allerdings erfordern CPV-Systeme eine präzise Nachführung, was sie teurer und komplexer macht (Abbildung 31) (Ceballos et al. 2023).

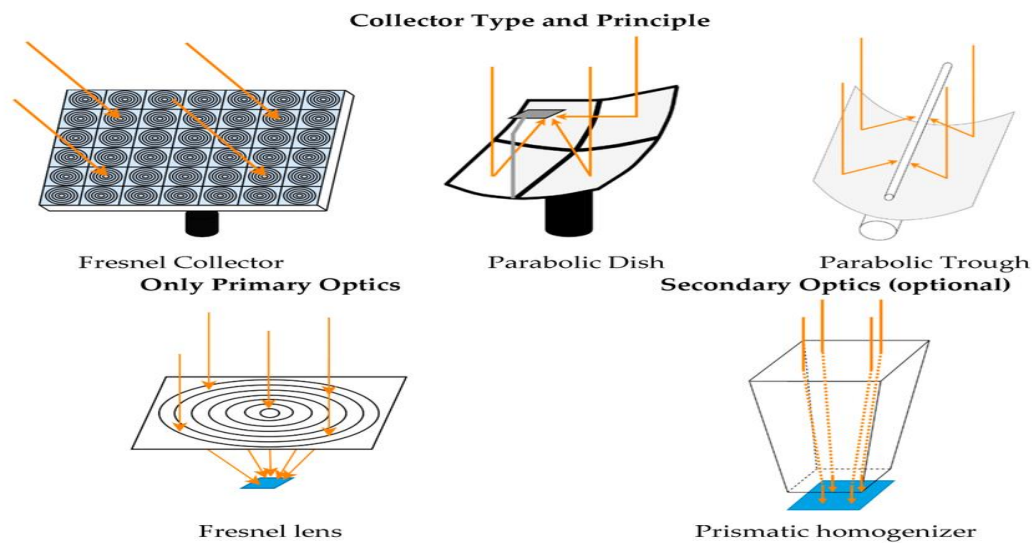


Abbildung 31: Konzepte für Konzentration-Photovoltaik-Systeme (CPV) (Felsberger et al. 2020).

4.5 Fundamentierung

In Deutschland wurde in Zusammenarbeit mit der Demeter-Anbaugemeinschaft Heggelbach und BayWa Solar Projects, Hilber GmbH eine APV-Anlage entwickelt (Trommsdorff et al. 2021). Zur Gründung der PV-Module wurde ein Spinnanker-system eingesetzt (ebd.). Dabei handelt es sich um ein spezielles betonloses Fundament, das nach einem ähnlichen Prinzip wie Baumwurzeln funktioniert (ebd.). In eine kreisförmige Bodenplatte wurden Gewindestangen aus Stahl mit einem Durchmesser von 1 cm eingeschraubt (ebd.). Sowohl die Gewindestangen als auch die Stangenlänge (2 bis 8 m) waren variabel und ermöglichten eine flexible Anpassung an den Untergrund (ebd.). Der Vorteil dieses Systems liegt in der schnellen und einfachen Montage und Demontage ohne größere negative Auswirkungen auf den Boden und in der möglichen Wiederverwendung einiger Teile (ebd.). Abbildung 32 zeigt die Installation des APV-Systems.



Abbildung 32: Direkte Verankerung von APV-Anlagen im Boden mittels Spinnankern. Spinnanker nach dem Vorbild von Baumwurzeln, ein betonfreies Fundament für die APV-Montagestruktur (Spinnanker GmbH 2024; Wolf GmbH o. J.)

4.6 Potenziale für Marokko

Die APV stellt eine innovative Strategie dar, um den Herausforderungen der steigenden Nachfrage nach Nahrungsmitteln und sauberer Energie zu begegnen (Toledo und Scognamiglio 2021). Diese doppelte Landnutzung bietet eine Reihe von Vorteilen, sowohl für die Landwirtschaft als auch für die Energieerzeugung, was für ein Land wie Marokko, das mit spezifischen klimatischen und wirtschaftlichen Bedingungen konfrontiert ist, von besonderer Bedeutung ist (Trommsdorff et al. 2024). Die Vorteile sind hauptsächlich in Regionen mit begrenzten Landressourcen und hohem Bedarf an erneuerbaren Energien von Bedeutung (ebd.). Die Technologie trägt dazu bei, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern und die nationalen Ziele für erneuerbare Energien zu erreichen, was im Einklang mit der marokkanischen Energiestrategie steht, die den Übergang zu erneuerbaren Energien und Energieeffizienz in allen Verbrauchssektoren der Wirtschaft unterstützt (Choukri et al. 2017). Darüber hinaus kann die APV die Widerstandsfähigkeit der Landwirtschaft gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels erhöhen, indem sie die Pflanzen vor extremer Hitze und Trockenheit schützt (Trommsdorff et al. 2024). Die Beschattung durch Solarmodule kann die Bodentemperatur senken, die Verdunstung verringern und damit den Wasserbedarf der Pflanzen reduzieren, was in einem ariden Klima wie Marokko von entscheidender Bedeutung ist (ebd.).

Die Vorteile der APV können zu höheren Ernteerträgen und einer besseren Qualität der Produkte führen. Gleichzeitig ermöglicht die Stromerzeugung durch Solarmodule den Landwirten eine zusätzliche Einnahmequelle, die ihre wirtschaftliche Stabilität erhöht und sie widerstandsfähiger gegen Ernteaufschläge und Marktschwankungen macht (Trommsdorff et al. 2024). Durch die dezentrale Erzeugung von Solarstrom können Landwirte ihren Eigenbedarf decken und überschüssigen Strom ins Netz einspeisen, was ihre Abhängigkeit von teurem Netzstrom verringert und ihre Gesamtkosten senkt (ebd.). Die Technologie kann die Lebensqualität in ländlichen Gemeinden verbessern, indem sie Zugang zu sauberer und erschwinglicher Energie bietet, neue Arbeitsplätze schafft und die lokale Wirtschaft ankurbelt (ebd.).

Für die Energieerzeugung in Marokko bietet die APV eine Reihe von Vorteilen. APV-Systeme können dazu beitragen, die Stromversorgung zu diversifizieren und die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern, was im Einklang mit den nationalen Zielen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen steht (Boulakhbar

et al. 2020; Trommsdorff et al. 2024). Durch die Nutzung bereits landwirtschaftlich genutzter Flächen für die Stromerzeugung minimiert die APV den Flächenverbrauch und reduziert die Notwendigkeit, unberührte Naturflächen für Solarparks zu erschließen (Trommsdorff et al. 2024). Dies ist besonders wichtig in einem Land wie Marokko, in dem die Landressourcen begrenzt sind und der Schutz der Biodiversität eine hohe Priorität hat (Arabi et al. 2024). Die Technologie kann die Stabilität des Stromnetzes verbessern, indem sie dezentrale Erzeugungskapazitäten bereitstellt und Übertragungsverluste reduziert (Gonocruz et al. 2022). Da der Stromverbrauch in Marokko seit 2002 jährlich um durchschnittlich 7% gestiegen ist, stellt die Energiesicherheit eine große Herausforderung dar (Boulakhbar et al., 2020). Die Nutzung von Solarenergie ist eine wichtige Lösung, um den Verbrauch fossiler Brennstoffe zu reduzieren (Holechek et al. 2022) .

Die APV könnte eine wichtige Rolle bei der Erreichung der oben beschriebenen Ziele der Energieversorgung Marokkos spielen, indem sie eine nachhaltige und effiziente Nutzung der Landressourcen ermöglicht und gleichzeitig zur Energieversorgung beiträgt. Die marokkanische Gesetzgebung zur Förderung erneuerbarer Energien zielt darauf ab, die Erzeugung, Vermarktung und den Export von Energie aus erneuerbaren Quellen durch öffentliche oder private Einrichtungen zu fördern (Ghezloun et al. 2014). Um das volle Potenzial der APV in Marokko auszuschöpfen, sind jedoch weitere Forschung und Entwicklung, politische Unterstützung und Investitionen erforderlich.

Die erfolgreiche Umsetzung der APV in Marokko erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Landwirten, Energieversorgern, Forschungseinrichtungen und politischen Entscheidungsträgern. Es ist wichtig, die spezifischen Bedürfnisse und Bedingungen der marokkanischen Landwirtschaft zu berücksichtigen und die APV-Systeme entsprechend anzupassen. Die Technologie sollte so gestaltet werden, dass sie die landwirtschaftlichen Prozesse nicht beeinträchtigt und die Ernteerträge maximiert. Die Landwirte sollten über die Vorteile der APV informiert und in den Planungsprozess einbezogen werden, um ihre Akzeptanz und ihr Engagement sicherzustellen. APV kann den Energieverbrauch landwirtschaftlicher Betriebe klimafreundlicher decken (Trommsdorff et al. 2024). Die Einspeisevergütung stellt einen ökonomischen Anreiz für Landwirte dar, in die Technologie zu investieren (ebd.). Darüber hinaus ist es wichtig, die Auswirkungen der APV auf die Umwelt und die Biodiversität zu überwachen und sicherzustellen, dass die Systeme nachhaltig und umweltfreundlich betrieben werden.

5.2 Begründung der Standortwahl: Midelt, Marokko

Die Wahl von Midelt als Standort für das Pilotprojekt basiert auf mehreren Schlüsselfaktoren, die diesen Standort besonders geeignet und relevant für diese APV-Studie machen:

Die Region Midelt trägt einen erheblichen Anteil (zwischen 31 % und 53 %) zur nationalen Apfelproduktion bei (FreshPlaza 2012; Bouichou et al. 2024). Die Äpfel aus Midelt genießen den Status einer geschützten geografischen Angabe und sind aufgrund ihrer Qualität und Sortenvielfalt landesweit hoch angesehen (Masen 2017a). Midelt gilt als eines der wichtigsten Apfelanbaugebiete Marokkos und wird oft als ‚Apfelhauptstadt‘ bezeichnet (Masen 2017a; Visit Drâa Tafilalet 2023).

Midelt hat ein Klima mit ausgeprägten Jahreszeiten, einschließlich kalter Winter (INRA 1993; El Harrouni et al. 2024). Diese sind für eine erfolgreiche Ruhephase der Apfelbäume sowie die anschließende Blüte und Fruchtentwicklung mit den notwendigen Kältestunden (typischerweise 600 bis 1 500 Stunden, je nach Sorte) erforderlich (ebd.).

Die Region verfügt über bedeutende Sonnenressourcen mit geschätzten 3000 Sonnenstunden pro Jahr, was sie für die Photovoltaische Stromerzeugung sehr geeignet macht (Abbildung 34) (Benbba et al. 2024).

Obwohl in der Region die Quelle des Moulouya-Flusses liegt und sie von Gebirgsquellen profitiert, leidet die weitere Region unter erheblichem Wasserstress, der durch wiederkehrende Dürren noch verschärft wird (Tekken und Kropp 2012; Bekri et al. 2021; Hachem et al. 2023). Der Einsatz von APV-Systemen, die den Wasserbedarf der Pflanzen durch Beschattung reduzieren und das Sammeln von Regenwasser ermöglichen können, ist in solchen wasserarmen landwirtschaftlichen Gebieten besonders relevant (Ghosh 2023).

Midelt stellt eine Kombination aus hohem landwirtschaftlichem Wert (Äpfel), bedeutendem Solarenergiepotenzial und dringenden Herausforderungen im Bereich der Wasserressourcen dar (Lempp und Zeppenfeld 2018; Bouichou et al. 2024; FreshPlaza 2025). Dies macht Midelt zu einem idealen Standort, um die synergetischen Vorteile und Kompromisse bei der Kombination von Solarenergieproduktion und hochwertiger Landwirtschaft durch APV zu untersuchen.

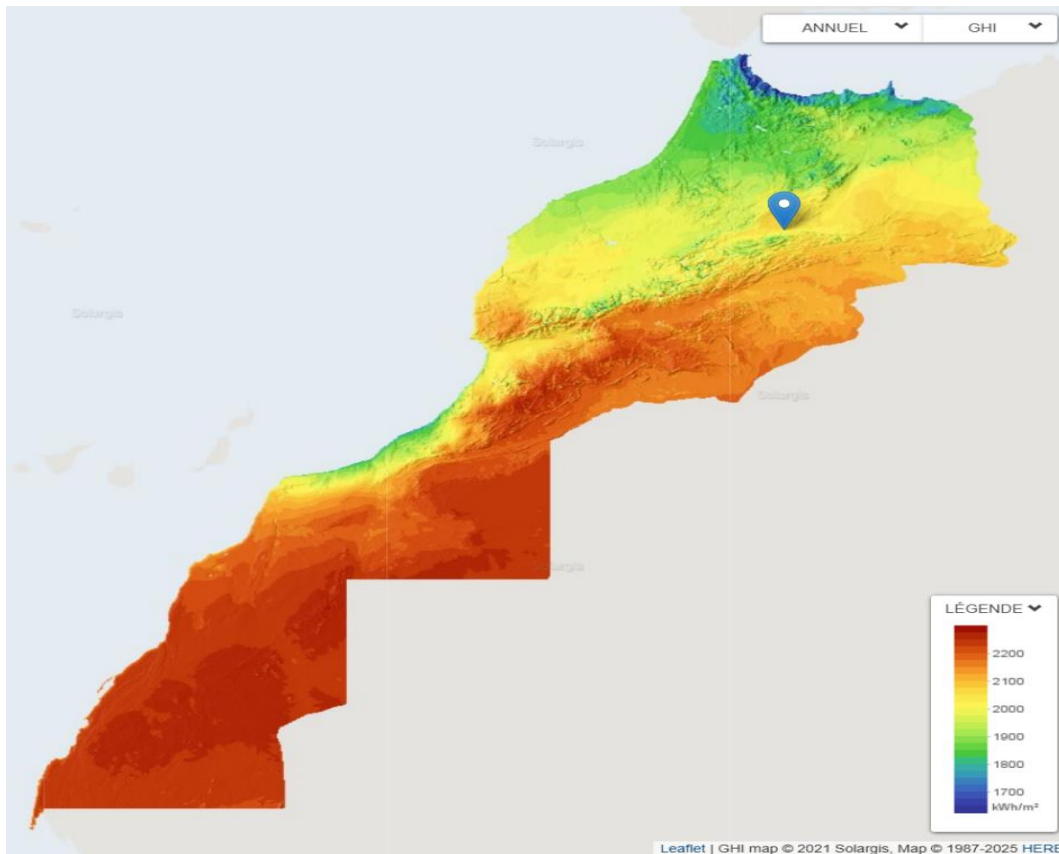


Abbildung 34: Jährliche Global Horizontal Insolation (GHI) in der Provinz Midelt, Marokko, basierend auf Daten des Global Solaratlas (Solargis 2025).

5.3 Methodik

Die Studie verwendet einen systematischen Ansatz zur Analyse der technischen und wirtschaftlichen Aspekte der Implementierung eines APV-Systems mit Apfelbäumen auf einer Fläche von einem Hektar in Midelt, Marokko. Die Methodik kombiniert Literaturrecherche, Datenerhebung, technische Planung und ökonomische Modellierung, um eine umfassende Bewertung des vorgeschlagenen Systems zu ermöglichen.

5.4 Technische Analyse

Das technische Design des APV-Systems für die 1 Hektar große Apfelplantage basiert auf der Integration der Anforderungen sowohl der solaren Energieerzeugung als auch des Apfelanbaus. Dieser Abschnitt beschreibt im Detail das vorgeschlagene Systemlayout, die Komponentenspezifikationen und die wichtigsten technischen Überlegungen, die aus dem anfänglichen Input des Nutzers und der nachfolgenden Forschung abgeleitet wurden.

5.4.1 Überlegungen zu Standort und Pflanzenanordnung

Das Untersuchungsgebiet umfasst eine Fläche von 1 ha (10.000 m²) mit einer Größe von ca. 100 m x 100 m. Die Hauptkultur sind Apfelbäume, insbesondere Sorten wie Golden Delicious, Starkrimson und Starking Delicious, die in der Region Midelt weit verbreitet sind (Kara et al. 2025). Die Installation von APV in Apfelplantagen bietet die Möglichkeit, die Sonneneinstrahlung zu modulieren, die Temperatur zu regulieren und den Wasserverbrauch zu reduzieren, was sich positiv auf das Wachstum, die Qualität und den Ertrag der Früchte auswirken kann (Juillion et al. 2022; Magarelli et al. 2025). Untersuchungen zeigen, dass diese Sorten bei voller Sonneneinstrahlung (6-8 Stunden pro Tag) gut gedeihen und in modernen Obstplantagen häufig in Pflanzsystemen mit hoher Pflanzdichte angebaut werden (Rankel 2024, 2025). Typische Pflanzabstände bei hoher Pflanzdichte sind 1-2 Meter in der Reihe und etwa 3-5 Meter zwischen den Reihen (Parker et al. 1998; Uselis et al. 2020). Dieser Abstand ist eine kritische Randbedingung für das Design des APV-Systems, um ausreichend Platz für das Wachstum der Bäume und den Zugang für Maschinen zu gewährleisten und gleichzeitig die Landnutzung zu maximieren.

5.4.2 APV-Systemkonfiguration

Es wird eine hoch aufgeständerte, fest geneigte Montagestruktur mit einem Neigungswinkel von 27° vorgeschlagen. Dieser Winkel ist konsistent mit gängigen APV-Designs für Obstplantagen (z.B. Projekt Gelsdorf, Fraunhofer ISE, 2022) und wurde speziell gewählt, um die Kompatibilität mit Regenwassernutzung (Rainwater Harvesting, RWH) zu verbessern, wie später in dieser Studie detailliert beschrieben wird. Die Hauptmerkmale sind:

- Montagestruktur: Hoch aufgeständerte Struktur mit ausreichendem Freiraum für landwirtschaftliche Aktivitäten (Abbildung 35).
- Höhe: Die Mindesthöhe unter den Modulen beträgt 3 m. Diese Höhe berücksichtigt die ausgewachsene Größe von Apfelbäumen in hoher Dichte (typischerweise etwa 2-2,5 m) (Callesen 1989; Uselis et al. 2020).
- Ausrichtung: Während in der nördlichen Hemisphäre eine Südausrichtung den Energieertrag maximiert, wird auch eine Ost-West-Ausrichtung der Modulreihen in Betracht gezogen. Diese Konfiguration kann zu einer gleichmäßigeren Lichtverteilung über den Tag hinweg führen, potenziell übermäßige Verschattung unter den Paneelen reduzieren und die

Fruchtentwicklung fördern, wie einige Forschungsergebnisse des APV nahelegen (Al Garni et al. 2019; Rock 2020; Ghosh 2023; Mazzeo et al. 2025). Die optimale Ausrichtung würde eine detaillierte Simulation erfordern, die den lokalen Sonnenverlauf und die spezifischen Lichtreaktionen der Pflanzen berücksichtigt.

- **Reihenanzordnung:** Die Anordnung besteht aus 20 parallelen Reihen entlang der 100 Meter langen Anlage. Die Reihen haben einen Abstand von 5 m (Mitte zu Mitte). Bei einer Modulbreite von 1 m (horizontal montiert entlang der 2 m Dimension) verbleibt bei diesem Abstand ein Abstand von 3 m zwischen den Rändern der Modulfelder in benachbarten Reihen. Dieser große Abstand soll eine ausreichende Besonnung (Photosynthetisch Aktive Strahlung, PAR) der unter und zwischen den Reihen gepflanzten Apfelbäume ermöglichen und damit deren hohem Lichtbedarf Rechnung tragen (Abbildung 35).



Abbildung 35: Überarbeitete Darstellung der APV-Anlage mit Maßangaben [Grafik überarbeitet, eigene Bearbeitung nach (Raiffeisenzeitung 2022)].

5.4.3 Photovoltaik-Komponenten

Die Kernkomponenten des Stromerzeugungssystems sind wie folgt spezifiziert:

- PV-Module: Es werden bifaziale semitransparente Module Typ Zebra gewählt, mit einer Lichtdurchlässigkeit von 49%.
- Abmessungen: 2,0 m × 1,0 m pro Modul.
- Anordnung: 100 Module werden in Längsrichtung in Reihen von 100 m angeordnet.
- Gesamtanzahl: 20 Reihen × 100 Module/Reihe = 2.000 Module (Abbildung 36).
- Nennleistung: ca. 360 Wp pro Modul. Dieser Wert ergibt sich aus dem ursprünglichen Gesamtkapazitätsziel des Nutzers (720 kWp) geteilt durch die Gesamtzahl der Module. Eine Nennleistung von 360 Wp für ein 2 m² großes semitransparentes Modul wird als realisierbar angesehen, obwohl sie potenziell geringer ist als bei opaken Modulen gleicher Größe.
- Installierte Gesamtleistung (DC): Die DC-Nennleistung des Systems wird berechnet als 2.000 Module × 360 Wp/Modul = 720.000 Wp oder 720 kWp.

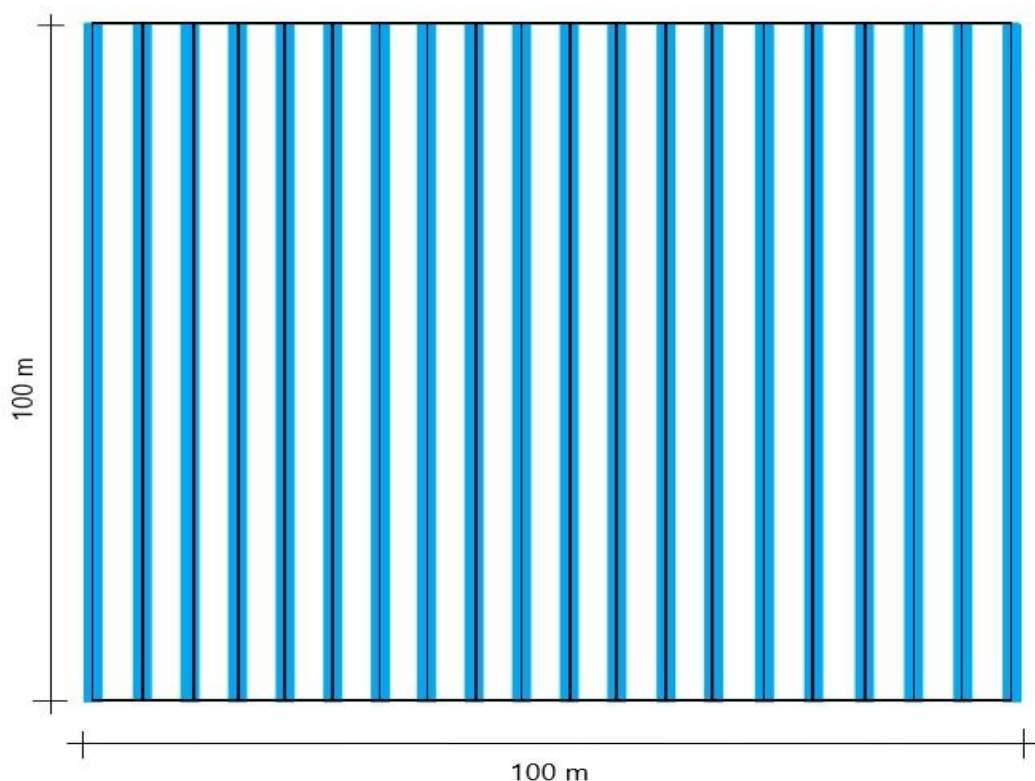


Abbildung 36: Draufsicht auf die modellierte APV-Anlage. Die Modulreihen sind blau, die Unterkonstruktion schwarz dargestellt (eigene Darstellung).

5.4.4 Balance of System (BOS)

Neben den Modulen umfasst das System wesentliche BOS-Komponenten:

- Wechselrichter: Entsprechend dimensionierte String- oder Zentralwechselrichter sind erforderlich, um den von den Modulen erzeugten Gleichstrom in für das Netz oder den lokalen Verbrauch geeigneten Wechselstrom umzuwandeln. Die Gesamtleistung der Wechselrichter wird auf der Grundlage der DC-Leistung von 720 kWp und eines geeigneten DC/AC-Verhältnisses (typischerweise zwischen 1,1 und 1,3) ausgewählt (Kawenukultorn et al. 2024).
- Verkabelung: Umfasst die DC-Kabel, die die Module und Strings mit den Wechselrichtern verbinden, sowie die AC-Kabel, die die Wechselrichter mit dem Netzanschlusspunkt oder den Verbrauchern verbinden.
- Netzanschluss: Die für den Anschluss an das lokale Stromnetz erforderliche Ausrüstung, einschließlich eines Aufwärtstransformators (falls erforderlich), Schaltanlagen, Schutzrelais und Messsysteme.

5.4.5 Technische Aspekte und Synergien

Für eine erfolgreiche, technische Integration des APV-Systems in die Apfelplantage sind mehrere Faktoren entscheidend:

- Lichtmanagement: Das Gleichgewicht zwischen solarer Energieerzeugung und Pflanzenertrag ist von größter Bedeutung. Der Reihenabstand von 5 Metern und die semitransparenten Module sind so konzipiert, dass sie ausreichend Licht liefern, aber eine genaue Modellierung und potenziell einstellbare Neigungswinkel oder dynamische Beschattungsstrategien könnten die Lichtbedingungen für die Apfelbäume weiter optimieren (Juillion et al. 2022; Mouhib et al. 2024). Untersuchungen zeigen, dass zwar eine gewisse Ertragsminderung durch Beschattung möglich ist (Weselek et al. 2021; Juillion et al. 2022), die mikroklimatischen Vorteile dies jedoch teilweise kompensieren könnten, hauptsächlich in heißen, sonnigen Klimazonen wie Midelt. Zudem wird über einen effektiven Schutz vor Spätfrösten berichtet, sowie eine hohe Reduktion im Auftreten von Apfelkrankheiten wie Apfelschorf (*Venturia inaequalis*) (Dupraz et al. 2011; Rühmer und Steinbauer 2023).

- **Wassermanagement:** Die APV-Struktur kann die Wasserdynamik beeinflussen. Sie kann die Verdunstungsverluste aus dem Boden aufgrund von Beschattung verringern und damit potenziell den Bewässerungsbedarf reduzieren (Wu et al. 2014; Asa'a et al. 2024). Untersuchungen zur Defizitbewässerung in marokkanischen Apfelplantagen deuten darauf hin, dass die Nutzung von 75 % der berechneten pflanzlichen Evapotranspiration die Erträge sogar steigern kann (El Jaouhari et al. 2018). Das APV-System sollte so konzipiert werden, dass es sich nahtlos in effiziente Bewässerungsmethoden wie Tröpfchenbewässerung integrieren lässt und potenziell weitere Wassereinsparungen ermöglicht. Der gewählte Neigungswinkel erleichtert zudem die RWH.
- **Strukturelle Integrität:** Die aufgeständerte Montagestruktur muss so konstruiert sein, dass sie den lokalen Umweltbedingungen, einschließlich Windlasten, potenziellen Schneelasten (angesichts der Höhe von Midelt) und seismischen Aktivitäten standhält, um langfristige Stabilität und Sicherheit sowohl für das PV-System als auch für die landwirtschaftlichen Aktivitäten darunter zu gewährleisten.
- **Betriebliche Kompatibilität:** Das Design muss effiziente Bewirtschaftungspraktiken in Obstplantagen ermöglichen, einschließlich Beschneiden, Spritzen und Ernten, ohne signifikante Behinderung durch die PV-Struktur.

5.4.6 Integration einer Super Capacitor Batteriebank

Die Integration eines Energiespeichersystems ist ein Schlüsselfaktor für die Optimierung der Leistung und der Betriebssicherheit der 720 kWp APV-Anlage, hauptsächlich im Hinblick auf die tageszeitlichen und saisonalen Schwankungen der Sonneneinstrahlung und die spezifischen Anforderungen der Apfelplantage in Midelt. Basierend auf einer detaillierten Analyse der technischen Anforderungen, des Betriebsprofils und der erwarteten Lastkurven wurde für dieses Projekt ein Superkondensator-Speichersystem mit einer Kapazität von 121 kWh und einer Autonomiezeit von 1 Tag ausgewählt.

Die gewählte Speicherkapazität dient nicht nur der Sicherung der Energieversorgung für wesentliche, landwirtschaftliche Prozesse wie Bewässerung und Steuerung, sondern berücksichtigt auch potenzielle zukünftige Anwendungen. Hierzu zählen z.B. Kühlhäuser oder Lagereinrichtungen für temperaturempfindliche Produkte, die zwar nicht permanent betrieben werden, aber phasenweise einen hohen

Energiebedarf aufweisen. Bei gemeinschaftlicher Nutzung - z.B. durch mehrere Betriebe in einem Dorf oder für verschiedene Kulturen - kann das System noch wirtschaftlicher betrieben werden. Darüber hinaus kann überschüssige Energie für zusätzliche Anwendungen wie eine Stromtankstelle oder die Versorgung dezentraler, lokaler Infrastrukturen genutzt werden.

Diese erweiterten Nutzungsmöglichkeiten erhöhen nicht nur die Energieeffizienz, sondern tragen auch wesentlich zur wirtschaftlichen Nachhaltigkeit des Projekts bei, etwa durch zusätzliche Einnahmen aus gemeinschaftlich genutzten Kühlkapazitäten oder energiebezogenen Dienstleistungen. Gleichzeitig profitieren lokale Haushalte und landwirtschaftliche Betriebe von einer zuverlässigen und nachhaltigen Energieversorgung, was langfristig zur wirtschaftlichen Stärkung und Resilienz der Region beiträgt.

Superkondensatoren sind ideal für die Integration in PV-Anlagen, insbesondere in Verbindung mit landwirtschaftlichen Lasten, da sie hohe Leistung über kurze Zeiträume effizient bereitstellen können (Zhang et al. 2023a; Obulesu 2025). Schwankungen in der Solarstromproduktion, die durch Bewölkung und Abschattungseffekte der APV-Struktur verursacht werden, können durch die hohe Leistungsdichte der Superkondensatoren ausgeglichen werden, was eine stabilere Stromversorgung ermöglicht (Nelson 2010; Malinkovich et al. 2024). Diese schnelle Reaktionsfähigkeit trägt zur Erfüllung der Netzanschlussbedingungen und zur Aufrechterhaltung der Spannungsqualität bei (EIT InnoEnergy 2022).

Das Lastprofil der Apfelplantage erfordert häufig hohe Leistungsimpulse, zum Beispiel beim Start von Bewässerungspumpen. Superkondensatoren können solche Spitzen ohne Spannungseinbrüche abdecken (EIT InnoEnergy 2022). Sie speichern zwar weniger Energie als Lithium-Ionen-Batterien, bieten aber ein hervorragendes Leistungsmanagement (Gopi und Ramesh 2024; Tiwari 2024). Mit einer Kapazität von 121 kWh stabilisieren sie die Schwankungen der PV-Leistung und sorgen für eine zuverlässige Energieversorgung.

Superkondensatoren sind zudem weniger anfällig für Leistungseinbußen bei extremen Temperaturen und bieten einen breiten Betriebsbereich, was sie besonders für die heißen Sommermonate in Midelt geeignet macht (Okonye und Ren 2024; Mazloomian et al. 2025). Ihre hohe Zykluslebensdauer von mehreren Hunderttausend bis Millionen Zyklen passt gut zur langen Lebensdauer von PV-Anlagen (Murray und Hayes 2015; Annigoni et al. 2019; Zhu et al. 2025).

5.4.7 Integration einer Regenwassernutzungsanlage

Zur weiteren Verbesserung des Wassermanagements und der Nachhaltigkeit wird ein Regenwassernutzungssystem (RWH) in die Planung integriert. Dabei wird die APV-Struktur als Auffangfläche genutzt (Abbildung 38). Die Integration eines RWH-Systems stellt eine strategische Erweiterung des APV-Projekts in Midelt (Marokko) dar. Dies liegt in der Wasserknappheit der Region und der APV-Struktur begründet. Midelt leidet unter Wasserstress, der durch Dürren und den Klimawandel verschärft wird. Der Apfelanbau ist wasserintensiv, die Sicherung nachhaltiger Wasserquellen ist entscheidend für die Rentabilität der Plantagen (Gush et al. 2019). Die APV-Anlage hat eine ausgedehnte Überkopf-Anordnung von 2.000 PV-Modulen (ca. 4.000 m²). Sie bietet eine ideale Auffangfläche für das Regenwasser. Dieses kann effizient kanalisiert und gesammelt werden. Die Sammlung des Regenwassers direkt von den Moduloberflächen stellt eine zusätzliche Wasserquelle dar und reduziert die Abhängigkeit der Plantage von potenziell überlasteten, konventionellen Wasserquellen. Das Regenwasser wird über einen Sedimentfilter und eine Durchflussregelung in einen Wasserspeicher geleitet, bevor es an die Verbraucher verteilt wird; das gesammelte Regenwasser kann zur Bewässerung der Apfelbäume und zur Reinigung der PV-Module verwendet werden (Abbildung 37). Forschungsergebnisse heben das Potenzial der Kombination von PV-Anlagen mit RWH hervor, insbesondere in ariden und semiariden Regionen (Rößner 2022; Waterloo et al. 2025).

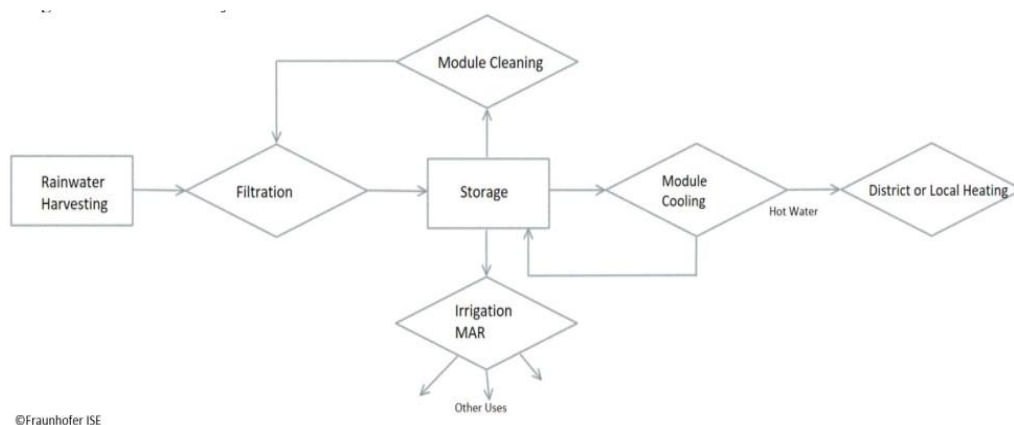


Abbildung 37: Flussdiagramm eines integrierten Wassermanagement-Ansatzes für APV-Systeme (Rößner 2022).

Die Verwendung von gesammeltem Regenwasser zur Reinigung vermeidet die Nutzung anderer Wasserressourcen. Studien deuten auf Synergien bei der Nutzung von gesammeltem Regenwasser zur Verdunstungskühlung der PV-Module hin, was deren Energieumwandlungseffizienz steigern kann (Bellini 2020; Rößner 2022). Die primäre Begründung ist die Erweiterung der Wasserressourcen für die Bewässerung, die sekundären Vorteile stärken die Argumente für die Integration der RWH. Die Einbindung eines RWH-Systems nutzt die vorhandene Struktur der APV-Installation, um einer kritischen lokalen Umweltherausforderung zu begegnen. Sie verbessert das Nachhaltigkeitsprofil des Projekts, steigert die Betriebseffizienz und stärkt die Resilienz der Apfelplantage gegenüber Dürre und Klimavariabilität. Abbildung 38 zeigt Details des RWH-Systems in der APV-Anlage.



Abbildung 38: Details RWH-System in der APV-Anlage in Alhéndin, Südspanien (Bousi 2024).

Wasserbedarf der Plantage

Die 1 Hektar große Apfelplantage hat einen geschätzten jährlichen Gesamtwasserbedarf von 8.000 m³, basierend auf einem geschätzten Bedarf von 700-900 mm/Jahr für Apfelbäume in Marokko (Moinina et al. 2019). Bei einem Mittelwert von 800 mm/Jahr beträgt die Berechnung $0,8 \text{ m/Jahr} \times 10.000 \text{ m}^2 = 8000,0 \text{ m}^3/\text{ha}$.

Natürliche Niederschläge tragen etwa 3.000 m³/ha pro Jahr (berechnet aus 0,300 m Niederschlag pro Jahr $\times$ 10.000 m² pro Hektar) bei (ClimateData 2025).

Daher beträgt das geschätzte jährliche Bewässerungsdefizit, das durch zusätzliche Quellen gedeckt werden muss, 5.000 m³/ha. Der Bewässerungsbedarf ist in den heißen und trockenen Sommermonaten (Juli-August) am höchsten (Moinina et al. 2019).

Berechnung der effektiven Sammelfläche (F) und der jährlich sammelbaren Regenwassermenge (PW) auf der Grundlage der Auslegung des APV-Systems.

Gegebene Werte:

- K (Abflussbeiwert) = 0,75 (angenommen für PV-Oberflächen).
- l (Modullänge) = 2 m.
- b (Modulbreite) = 1 m.
- α (Anstellwinkel) = 27°.
- n (Anzahl Module) = 2.000.
- H (Jährlicher Niederschlag in Midelt) = ca. 300 mm = 0,30 m.

Formel:

$$\begin{aligned} \text{Effektive Sammelfläche (F)} &= l \cdot \cos(\alpha) \cdot b \cdot n \\ &= F \cdot H \cdot K \end{aligned}$$

Berechnung der effektiven Sammelfläche F:

$$F = 2 \cdot \cos(27^\circ) \cdot 1 \cdot 2000 \cos(27^\circ) \approx 0,8910$$

$$F = 2 \cdot 0,8910 \cdot 2000 = 3564 \text{ m}^2.$$

Berechnung der potenziell sammelbaren Regenwassermenge PW:

$$PW = 3564 \text{ m}^2 \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 0,75$$

$$PW \approx 801,9 \text{ m}^3/\text{Jahr}$$

Ergebnis: Mit den gegebenen Parametern hat das APV-System in Midelt das Potenzial, ca. 802 m³ Regenwasser pro Jahr zu sammeln. Dieses Volumen könnte für die zusätzliche Bewässerung der Apfelkulturen genutzt werden, hauptsächlich in Kombination mit effizienten Wassermanagement- und Speichertechniken.

Umsetzung und Kosten der RWH

Basierend auf dem oben identifizierten Potenzial für die Sammlung von Regenwasser (ca. 802 m³/Jahr von einer effektiven Fläche von 3.564 m²) kann ein spezielles RWH-System implementiert werden, um dieses Wasser für die Bewässerung zu sammeln und zu speichern. Eine Kostenschätzung und technische Annahmen für ein solches System unter Verwendung verzinkter Stahlbauteile werden im Folgenden dargestellt.

Technische Annahmen:

- Basis Sammelfläche: ca. 3.600-4.000 m² (basierend auf der berechneten effektiven PV-Fläche).
- Rinnensystem: ca. 2.000 m Regenrinnen und Halterungen aus verzinktem Stahl. Verzinkter Stahl wurde aufgrund seiner Robustheit, Langlebigkeit, UV- und Korrosionsbeständigkeit gewählt.
- Entwässerung: Passive Entwässerung über ca. 100 Fallrohre und Verbindungsstücke in einen Speicherteich oder Versickerungsgräben.
- Filterung: 2-4 einfache Filtersysteme (z.B. Laubfänger), um das Eindringen von Schmutz in den Speicher zu verhindern.
- Verrohrung: 100-200 m Rohre zur Verbindung der Falleleitungen mit den Speicher-/Versickerungsbereichen.
- Speicher: Ein Speicherteich mit einem Fassungsvermögen von 1.500 m³ wird in Betracht gezogen.
- Aushub: Erforderlich für den Speicherteich und die erforderlichen Gräben. Geschätzte Kosten (Tabelle 3).

Tabelle 3: Die Material- und Installationskosten für das Regenwassererntesystem (RWH) mit angeschlossenem Speicherteich (Dachrinnen-Shop GmbH o. J.; blechshop24 o. J.; MyHammer 2024; Chaabi 2025).

Komponente	Einheit / Menge	Stückpreis (€)	Gesamt (€)
Rinnen + Halterungen aus verzinktem Stahl	ca. 2.000 m	10–14 /m	20.000–28.000
Fallrohre + Anschlussstücke + Zubehör	ca. 100 Einheiten	30–50 /Einheit	3.000–5.000
Einfaches Filtersystem (Laubfänger)	2–4 Einheiten	100–150 /Einheit	300–600
Rohre für Speicherung / Versickerung + Anschlussstücke + Zubehör	ca. 100–200 m	8–12 /m	1.000–2.500
Erdarbeiten (Teich, Gräben etc.)	1 ha Fläche	Pauschale	1.000–1.500
Auskleidung/Vorbereitung Speicherteich	1.500 m ³	Pauschale	3.000
Geschätzte Gesamtkosten RWH-System			€28.300–40.600

Zusammenfassung: Die Kosten für ein vollständiges, passives RWH-System mit verzinkten Stahlrinnen für die effektive Sammelfläche von ca. 3.600-4.000 m² des APV-Systems werden auf 28.300 € bis 40.600 € geschätzt. Diese Kosten hängen stark von den lokalen Material- und Arbeitskosten ab. Diese Investition würde es ermöglichen, einen beträchtlichen Teil des jährlichen Niederschlags zu sammeln und zu speichern (Potenzial ca. 802 m³/Jahr), eine wertvolle Wasserressource für die Zusatzbewässerung bereitzustellen und die Widerstandsfähigkeit des Projekts gegenüber Wasserknappheit zu erhöhen.

5.5 Wirtschaftliche Analyse

In diesem Abschnitt wird die wirtschaftliche Machbarkeit der vorgeschlagenen 720 kWp APV-Anlage in Kombination mit einer Apfelplantage in Midelt, Marokko, bewertet. Die Analyse berücksichtigt die Installationskosten, die Betriebskosten, die

potenziellen Einnahmequellen aus dem Verkauf von Strom und Äpfeln sowie die wichtigsten finanziellen Leistungsindikatoren.

5.5.1 Installationskosten (CAPEX)

Die erforderlichen Anfangsinvestitionen für das APV-System werden auf der Grundlage spezifischer Kostenkomponenten geschätzt, die die potenziellen Marktbedingungen für solche Anlagen widerspiegeln. Die Aufschlüsselung pro Kilowatt-Peak (kWp) ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Installationskosten der APV-Anlage.

Komponente	€/kWp	Kosten (€)
Semi-transparente PV Module	240	172.800
Erhöhte Unterkonstruktion (Orchard)	243	174.960
Installation & Standortvorbereitung	93	66.960
Netzanschlussinfrastruktur	94	67.680
Verkabelung & elektrische Komponenten	49	35.280
Wechselrichter (PV)	31	22.320
Superkondensator-Batteriespeicher (121 kWh)	174	125.320
Batterie-Wechselrichter	32	23.049
RWH System	39	28.300
Gesamt CAPEX (Ausrüstung & Installation)	995	716.669 €

Anmerkungen: PV-Systemkosten nach (Schindele et al. 2020; Hopf 2021; Trommsdorff et al. 2024). Kosten des Batteriesystems aktualisiert auf Basis eines Preisvorschlags von (Photons Energy Ltd. 2021) (125.320 € für Speicher, 23.049 € für Wechselrichter). Die €/kWp-Werte wurden auf Basis einer Gesamtsystemkapazität von 720 kWp berechnet und auf die nächste, ganze Zahl gerundet.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Kosten für Unterkonstruktionen mit hoher Durchgangshöhe für APV-Systeme, insbesondere für Obstplantagen, erheblich variieren und höher sein können als für Standard-Freiflächensysteme. Diese Schätzung dient als Grundlage und sollte auf der Basis detaillierter Angebote von Lieferanten und technischer Bewertungen verfeinert werden.

5.5.2 Betriebs- und Wartungskosten (OPEX)

Die jährlichen Betriebskosten setzen sich aus den Kosten für das PV-System und die landwirtschaftlichen Aktivitäten zusammen (Tabelle 5):

- PV-System O&M Betrieb und Wartung (Operations and Maintenance): Geschätzt auf 10 €/kWp/Jahr, ein üblicher Richtwert für Solaranlagen im Versorgungsmaßstab, obwohl die spezifischen Kosten für APV aufgrund von Faktoren wie Zugänglichkeit für Modulreinigung und strukturelle Wartung variieren können. Dies führt zu jährlichen PV O&M Kosten von $10 \text{ €/kWp/Jahr} \times 720 \text{ kWp} = 7.200 \text{ €/Jahr}$.
- Landwirtschaftliche O&M: Beinhaltet Standardkosten für die Bewirtschaftung von Obstplantagen wie Beschneiden, Bewässerung, Düngung, Schädlings- und Krankheitsbekämpfung sowie Ernte. Während das APV-System diese Kosten beeinflussen kann (z.B. potenziell den Wasser- oder Pestizidbedarf reduziert, aber möglicherweise bestimmte Arbeiten erschwert), wird für diese Analyse eine Basisschätzung von 5.000 €/Jahr für eine 1 ha große Apfelplantage mit hoher Dichte angenommen. Dieser Wert muss anhand der lokalen landwirtschaftlichen Praktiken und Kosten in Middel validiert werden.
- Kosten des Batteriesystems aktualisiert auf Basis eines Preisvorschlags (Photons Energy Ltd. 2021).

Tabelle 5: Jährliche Betriebskosten (OPEX).

Posten	Annahme	Kosten pro Jahr (€)
O&M PV-System	10 €/kWp/Jahr	7.200
O&M Landwirtschaft	Basis-Schätzung	5.000
OPEX-Batterie	1,5% des Batterie-CAPEX	1.728
Gesamt OPEX		13.928 €/Jahr

5.5.3 Stromerzeugung und Einnahmen

Die geschätzte jährliche Stromproduktion basiert auf der Sonneneinstrahlung in Midelt und den technischen Spezifikationen des Systems:

- Sonneneinstrahlung: Midelt profitiert von einer hohen Sonneneinstrahlung. Laut Solargis-Daten (Solargis 2025) hat die Region eine globale horizontale Sonneneinstrahlung (GHI) von 1.969,0 kWh/m², eine direkte normale Sonneneinstrahlung (DNI) von 2.219,7 kWh/m² und ein spezifisches photovoltaisches Stromerzeugungspotenzial (PVOUT spezifisch) von 1.887,2 kWh/kWp. Dieser PVOUT-Wert, der die lokale Einstrahlung, Temperatur und typische Systemverluste berücksichtigt, wird zur Abschätzung des Energieertrags verwendet.
- Performance Ratio (PR): Es wird ein konservativer PR von 75% angenommen, der potenzielle Verluste aufgrund der semitransparenten Natur der Module, Temperatureffekte, Verschmutzung, Verschattung und Wechselrichter-/Kabelineffizienzen berücksichtigt (Lumby et al. 2012; Woyte et al. 2014).
- Jährlicher Energieertrag: Unter Verwendung des spezifischen PVOUT-Werts, der bereits Systemverluste und lokale Bedingungen berücksichtigt. Energie: $720 \text{ kWp} \times 1.887,2 \text{ kWh/kWp} = 1.358.784 \text{ kWh/Jahr} = 1.359 \text{ MW/Jahr}$.
- Stromertrag: Marokko hat derzeit keinen standardisierten Einspeisetarif für Erneuerbare-Energien-Projekte dieser Größenordnung (Leidreiter und Boselli 2015). Die Einnahmen würden wahrscheinlich von der Verdrängung des Netzstrombezugs (Eigenverbrauch) oder der Aushandlung eines

Stromabnahmevertrags (PPA) abhängen. Basierend auf den jüngsten durchschnittlichen Strompreisen in Marokko von ca. 0,10 €/kWh (Global-PetrolPrices 2025).

Jährlicher Stromertrag = 1.358.784 kWh/Jahr × 0,10 €/kWh = 135.878 €/Jahr.

Stromertrag & Einnahmen:

- Energieproduktion: 1.359 MWh/Jahr (Jahr 1, unterliegt einer jährlichen Degradation von 0,5 %).
- Vergütung (PPA oder Substitution): 0,10 €/kWh (konservativ).
- Jährliche Einnahmen aus Stromverkauf (Jahr 1): ≈ 135.878 €.

5.5.4 Landwirtschaftlicher Ertrag – Apfelproduktion

Im Apfelanbau können durch den Einsatz von PV-Anlagen erhebliche Einsparungen bei den Betriebsmittelkosten, hauptsächlich beim Pflanzenschutz, beim Frostschutz und beim Wasserbedarf erzielt werden. Das durch die PV-Module erzeugte Mikroklima führt zu einer Verringerung der Feuchtigkeitsbelastung der Pflanzen, da direkte Niederschläge und Tauablagerungen reduziert werden. Diese Bedingungen hemmen die Entwicklung von pilzlichen Krankheitserregern wie *Venturia inaequalis* (Apfelschorf), wodurch der Bedarf an Pflanzenschutzmitteln deutlich reduziert werden kann (Rühmer und Steinbauer 2023). Darüber hinaus wirken die Module als thermoregulierende Barriere, die den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre verlangsamt und so die Obstkulturen wirksam vor Spätfrösten schützt - ein entscheidender Vorteil für die Sicherung von Blüte und Erntequalität. Zudem führt die geringere direkte Sonneneinstrahlung unter den Anlagen zu einer geringeren Verdunstungsrate und damit zu einem geringeren Wasserbedarf der Apfelkulturen. Gerade in semiariden Regionen wie dem Mittleren Atlas Marokkos ist dies ein wichtiger Beitrag zu einer ressourcenschonenden und klimaangepassten Bewirtschaftung. Aufgrund dieser günstigen Rahmenbedingungen konnten unter APV bisher nur minimale Ertragsverluste beobachtet werden, was die technische und wirtschaftliche Attraktivität des Systems unterstreicht.

Es wird erwartet, dass die Integration des APV-Systems einen Einfluss auf die Apfelproduktion haben wird:

- **Basisertrag:** Nach standortspezifischen Daten liegt der durchschnittliche Apfelertrag in Midelt bei 30 Tonnen pro Hektar (t/ha) (Agrimaroc 2019).
- **Ertrag unter APV:** Die Beschattung durch die PV-Module kann den Ertrag und die Qualität der Früchte beeinflussen. Studien zu APV bei Äpfeln deuten auf eine mögliche Verringerung des Trockenmassegehalts der Früchte hin (Weselek et al. 2021; Juillion et al. 2022). In Regionen wie Marokko, die sich durch eine hohe und oft übermäßige Sonneneinstrahlung auszeichnen, stellt die Verschattung durch APV-Anlagen in der Regel keinen limitierenden Faktor für das Pflanzenwachstum dar. Vielmehr bietet sie einen zusätzlichen Schutz vor Hitzestress und Sonnenbrand der Früchte. Zudem zeigen mehrjährige Untersuchungen der Wein- und Obstbauversuchsstation Haidegg in Österreich, durchweg positive Ergebnisse, insbesondere bezüglich der Reduktion von Pflanzenkrankheiten. Damit ergibt sich ein hohes Einsparungspotenzial im Bereich Pflanzenschutz (Rühmer und Steinbauer 2023). Für diese Analyse wird eine konservative Ertragsreduktion von 0% im Vergleich zum Basisertrag angenommen. Geschätzter Ertrag = 30 t/ha (Tabelle 6).
- **Marktpreis für Äpfel:** Die Marktpreise schwanken. Basierend auf verschiedenen Quellen, die deutlich höhere Einzelhandelspreise angeben, wird ein konservativer Ab-Hof/Großhandelspreis von 0,48 €/kg (480 €/t) angenommen (Agrimaroc 2019).
- **Jährlicher Apfelertrag:** Geschätzter Ertrag (30,0 t) × Marktpreis (480 €/t) = 14.400 €/Jahr.

Tabelle 6: Jährliche Nettoeinnahmen aus Apfelertrag (Agrimaroc 2019; Rühmer und Steinbauer 2023).

Parameter	Wert
Ertragsniveau ohne PV	30 t/ha
Ertragsniveau mit APV	30 t/ha
Marktpreis (konservativ)	480 €/t
Jährliche Nettoeinnahmen aus Apfelertrag	14.400 €/Jahr

5.5.5 Stromgestehungskosten (LCOE)

Die Stromgestehungskosten, Levelized Cost of Electricity (LCOE), werden über die Lebensdauer der Anlage unter Berücksichtigung der getroffenen Schlüsselannahmen berechnet.

Schlüsselannahmen:

- Lebensdauer: 25 Jahre.
- Abzinsungssatz: 5 %.
- Degradationsrate: 0,5 % pro Jahr.
- Gesamt-CAPEX: 716.669 € (Jahr 0, einschließlich RWH-System).
- Jährliche OPEX (PV + Landwirtschaft + Batterie): 13.928 € /Jahr.
- Batterielebensdauer: 25 Jahre.
- Batteriewechsel: Keiner innerhalb des 25-jährigen Analysezeitraums (basierend auf 25-Jahres-Zyklus).
- Energieertrag (Jahr 1): 1.358.784 kWh/a.

Berechnung: Der LCOE wird berechnet, indem der Gesamtbarwert (PV) aller Kosten (CAPEX, jährliche OPEX, Batteriewechsel) durch den Gesamtbarwert (PV) der während der Lebensdauer der Anlage erzeugten Elektrizität unter Berücksichtigung des Diskontierungssatzes und der Degradation dividiert wird (Pawel 2014).

- Gesamter Barwert der Kosten: 912.969,46 € (einschließlich RWH CAPEX).
- Gesamter Barwert der Energieproduktion: 18.268.922,95 kWh.

$$LCOE = \frac{\text{Gesamter Barwert der Energieproduktion über die Lebensdauer}}{\text{Gesamter Barwert der Kosten über die Lebensdauer}}$$

$$LCOE = \frac{912.969,46}{18.268.922,95} \approx 0,0500 \text{ €/kWh}$$

Die endgültige LCOE, berechnet unter Berücksichtigung der aktualisierten Annahmen (einschließlich eines Batteriewechselzyklus von 25 Jahren und der Kosten für das RWH-System), beträgt ca. 5,00 ct/kWh.

5.5.6 Amortisationszeit (Payback Periode)

Die Amortisationszeit ist der Zeitraum, der benötigt wird, bis der kumulierte Netto-Cashflow die Anfangsinvestition deckt (Yard 2000).

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{Anfangsinvestition}}{\text{Jährlicher Netto Cashflow}} \quad (\text{falls der Cashflow jährlich konstant ist}) \quad (\text{Yard 2000}).$$

Wobei:

- Anfangsinvestition (CAPEX): 716.669 €
- Jährliche OPEX: 13.928 €
- Jährliche Einnahmen aus Stromverkauf (Jahr 1): 135.878 €
- Jährliche Einnahmen aus Apfelertrag: 14.400 €
- Jährliche Gesamteinnahmen (Jahr 1, vor Degradation): 135.878 € (Strom) + 14.400 € (Äpfel) = 150.278 €

Da sich der Cashflow hier jährlich leicht ändert (aufgrund der Degradation der PV-Module), wird das Jahr bestimmt, in dem der gesamte kumulierte Netto-Cashflow erstmals die Anfangsinvestition übersteigt. Der genaue Zeitpunkt wird dann durch den erforderlichen Anteil des Cashflows des Folgejahres bestimmt. Endgültig berechneter Wert (bei 14.400 € Apfeleinnahmen): Etwa 5,31 Jahre. Dies wurde ermittelt, indem die kumulierten jährlichen Netto-Cashflows (jährliche Gesamteinnahmen - jährliche OPEX) mit der Anfangsinvestition von 716.669 € verglichen wurden.

Amortisationszeit ≈ 5,31 Jahre.

5.5.7 Kapitalrendite ROI (Return on Investment)

Die Kapitalrendite (ROI) wird wie folgt berechnet (Zamfir et al. 2016):

$$ROI = \frac{\text{Gesamtnettogewinn}}{\text{Anfangsinvestition}} \times 100 \%$$

Dabei gilt:

Gesamtnettogewinn: Der Gesamtgewinn nach Abzug aller Kosten und Aufwendungen während des betrachteten Investitionszeitraums.

Anfangsinvestition: Die anfänglichen Kosten oder das investierte Kapital, das für das Projekt oder die Investition aufgebracht wurde.

- Gesamtnettogewinn = Gesamteinnahmen über die Lebensdauer - Gesamtkosten über die Lebensdauer.
- Gesamtkosten über die Lebensdauer = Anfangsinvestition + (jährliche OPEX × Projektlaufzeit).

Endgültig berechneter Wert (bei 14.400 € Apfeleinnahmen): ca. 333,81 % Dies wurde berechnet mit:

- Anfangsinvestition: 716.669 €.
- Gesamtnettogewinn über 25 Jahre: 2.392.579 € (Dies ist die Summe aller Strom- und Apfeleinnahmen über 25 Jahre, abzüglich der Anfangsinvestition und aller Betriebskosten über 25 Jahre).

ROI (25 Jahre): $(2.392.579 \text{ €} / 716.669 \text{ €}) * 100 \% \approx 333,81 \%$

Der durchschnittliche jährliche **ROI** beträgt $333,81 \% / 25 \approx 13,35 \%$

5.5.8 Fazit

Die 1 Hektar große APV-Anlage in Midelt mit einer Leistung von 720 kWp zeigt weiterhin ein erhebliches Potenzial für die Doppelnutzung von Flächen durch die Kombination von nachhaltiger Energieerzeugung und landwirtschaftlicher Produktion.

Es wird erwartet, dass das APV-System im ersten Betriebsjahr ca. 1,36 GWh Strom erzeugen wird, mit entsprechenden Einnahmen von ca. 135.878 € aus dem Stromverkauf (bei 0,10 €/kWh). Zusammen mit den jährlichen Apfeleinnahmen von 14.400 € (30 Tonnen Apfelertrag) bietet das Projekt einen soliden, kombinierten Einkommensstrom.

Die finanzielle Nachhaltigkeit des Projekts wird durch die Stromgestehungskosten (LCOE) von 5,00 ct/kWh bestätigt, die mit Hilfe einer Discounted-Cashflow-Analyse berechnet wurden. Der LCOE berücksichtigt die Lebenszykluskosten des PV-Systems, die Energieproduktion, einen Diskontsatz von 5%, eine Lebensdauer von

25 Jahren, eine jährliche Degradation von 0,5%, die Batteriewartungskosten, einen Batterieaustauschzyklus für die Superkondensatorbatterien sowie anfängliche CAPEX in Höhe von 716.669 € und jährliche OPEX in Höhe von 13.928 €. Es ist wichtig zu beachten, dass bei dieser LCOE-Berechnungsmethode die landwirtschaftlichen Erträge nicht direkt von den Kosten der PV-Anlage abgezogen werden.

Mit den Apfeleinnahmen erreicht das Projekt eine einfache Amortisationszeit von ca. 5,31 Jahren. Der Return on Investment (ROI) über die Projektlaufzeit von 25 Jahren beträgt überzeugende 334 %. Diese Zahlen unterstreichen die nachhaltige, finanzielle Attraktivität des Projektes.

Zusätzlich zu den direkten finanziellen Erträgen bietet das APV-System in Midelt bedeutende Co-Benefits. Es steigert die Effizienz der Landnutzung erheblich, indem es die gleichzeitige Produktion von Energie und Nahrungsmitteln auf derselben Fläche ermöglicht. Die Doppelnutzung trägt zur Widerstandsfähigkeit gegenüber Klimawandel, Pflanzenkrankheiten, Frostschäden an Apfelbaumblüten, Wasserknappheit und steigenden Energiepreisen bei.

Der gewählte Neigungswinkel erhöht das Potenzial für die Regenwassernutzung, und der zusätzliche Batteriespeicher kann potenziell die Netzstabilität oder den Eigenverbrauch verbessern, was den Mehrwert des Projekts weiter erhöht, insbesondere angesichts der niedrigeren, berechneten LCOE unter diesen Annahmen. Das System trägt zur Klimaresilienz bei, kann durch reduzierte Verdunstung und das Potenzial zur RWH (geschätzte 802 m³/Jahr) zur Minderung von Wasserknappheit beitragen und bietet eine Absicherung gegen volatile Energiepreise. Die Integration einer Superkondensator-Batteriebank erhöht den Wert des Projekts zusätzlich, indem sie eine verbesserte Netzstabilität oder einen erhöhten Eigenverbrauch ermöglicht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das APV-Projekt in Midelt auch mit den angepassten Apfeleinnahmen ein technisch fundiertes und wirtschaftlich tragfähiges Projekt darstellt. Die Kombination von erneuerbarer Energieerzeugung, landwirtschaftlicher Produktion und positiven Umweltsynergien macht es zu einem vielversprechenden Modell für eine nachhaltige Entwicklung in der Region.

6. Fazit, Diskussion und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, zu untersuchen, ob eine APV-Anlage rentabel und effizient ist und gleichzeitig Einblicke in die Integration von erneuerbaren Energien und Landwirtschaft in Marokko zu bieten. Die steigende Besorgnis über den Klimawandel hat das Interesse an erneuerbaren Energien verstärkt, was sich in veränderten Umweltrichtlinien vieler Länder widerspiegelt. In Marokko gehören Hagel, Spätfrost, Starkregen und Trockenheit zu den größten Risiken für den Apfelanbau. Die geografischen Bedingungen Marokkos begünstigen die Nutzung von Wind-, Sonnen- und Wasserkraft.

Die vorliegende Arbeit untersucht das Potenzial der APV als innovative und nachhaltige Lösung für die Herausforderungen der marokkanischen Landwirtschaft im Kontext des Klimawandels. APV-Systeme bieten die Möglichkeit, landwirtschaftliche Flächen weiterhin für die Nahrungsmittelproduktion zu nutzen und gleichzeitig erneuerbare Energie zu erzeugen. Sie stellen eine dezentrale und zunehmend genutzte Energiequelle dar. APV bietet zudem Schutz für verschiedene, landwirtschaftliche Anbauflächen in Marokko vor extremen Wetterereignissen und gleichzeitig die Möglichkeit, erneuerbare Energie zu erzeugen.

Die Ergebnisse der APV-Fallstudie in Midelt untermauern das Potenzial der APV für die gleichzeitige Erzeugung erneuerbarer Energie und nachhaltige Landwirtschaft unter semiariden Klimabedingungen. Im Vergleich zur bestehenden Fachliteratur treten mehrere distinkte Aspekte dieser Untersuchung hervor, die das Verständnis integrierter APV-Systeme in diesem Forschungsfeld erweitern.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse des APV-Systems in Midelt ergab Stromgestehungskosten (LCOE) von 5,00 ct/kWh, eine Amortisationszeit von 5,31 Jahren sowie eine Kapitalrendite (ROI) von ca. 334% über die 25-jährige Projektlaufzeit. Diese Ergebnisse schneiden im Vergleich zu den von Trommsdorff et al. (2024) berichteten Werten vorteilhaft ab. Letztere dokumentierten LCOEs zwischen 5,00 und 10,00 ct/kWh für vergleichbare APV-Installationen in mediterranen Klimazonen. Die verbesserte Wirtschaftlichkeit der vorliegenden Studie ist auf mehrere Faktoren zurückzuführen: die außergewöhnliche solare Einstrahlung in Midelt (1.969 kWh/m²/a), das optimierte Systemdesign mit bifazialen Modulen und die Integration landwirtschaftlicher Einnahmequellen.

Ein distinkter Beitrag dieser Studie ist die umfassende Integration und Quantifizierung des Potenzials der RWH im APV-Rahmen. Während frühere Studien, wie die

von Amaducci et al. (2018), die Wassereinsparungsvorteile von APV erwähnten, fokussierten sie sich primär auf die reduzierte Evapotranspiration und nicht auf die aktive Wassergewinnung. Die vorliegende Analyse zeigt, dass das 720-kWp-APV-System in Midelt potenziell etwa 736 m³ Regenwasser pro Jahr sammeln kann – eine signifikante Ressource in einer Region, in der Wasserknappheit eine kritische Einschränkung für die Landwirtschaft darstellt. Diese RWH-Komponente stellt eine Weiterentwicklung der Arbeit von Barron-Gafford et al. (2019) dar. In dieser wurde ein reduzierter Bewässerungsbedarf unter APV festgestellt, jedoch keine potenzielle Regenwassergewinnung ermittelt. Die wirtschaftlichen Auswirkungen sind erheblich: Das gesammelte Regenwasser kann die Bewässerungskosten kompensieren und die Erträge in Trockenperioden potenziell stabilisieren. Dadurch wird die Resilienz des Systems gegenüber Klimavariabilität erhöht – ein Vorteil, der in früheren wirtschaftlichen Bewertungen von APV nicht vollständig berücksichtigt wurde.

Die Integration einer Superkondensator-Batteriebank mit einer Kapazität von 121 kWh ist ein weiterer neuartiger Aspekt dieser Studie. Während sich Schindele et al. (2020) auf netzgekoppelte APV-Systeme konzentrierten, erweitert die vorliegende Analyse den Betrachtungsrahmen auf Szenarien, in denen die lokale Speicherung und Nutzung priorisiert wird. Dies ist besonders relevant für ländliche marokkanische Kontexte mit begrenzter Netzzuverlässigkeit. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigt, dass die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprojekts trotz der zusätzlichen Investitionsausgaben (CAPEX) von 148.369 € für das Batteriesystem robust bleibt. Die Batteriekomponente kann den Wert potenziell durch verbesserten Eigenverbrauch und Energiesicherheit steigern. Dieser Ansatz unterscheidet sich von der Mehrheit der bestehenden APV-Literatur, die typischerweise die Netzanbindung als primären Modus der Energienutzung annimmt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass dezentrale APV-Speichersysteme in ländlichen, landwirtschaftlich genutzten Gebieten wirtschaftlich tragfähig sein können und potenziell als Mikronetze für lokale Gemeinschaften dienen können. Dies ist eine Anwendung, die in früheren wirtschaftlichen Analysen von APV nicht eingehend untersucht wurde.

Die Fallstudie zeigt, dass der Bedarf an Pflanzenschutzmitteln unter APV-Systemen potenziell deutlich reduziert werden kann. Insbesondere könnte die Inzidenz von Apfelschorf (*Venturia inaequalis*) darunter verringert werden (Rühmer und Steinbauer 2023). Dieser potenzielle Effekt stimmt mit den Ergebnissen von Rühmer und Steinbauer (2023) überein, die ähnliche phytopathologische Vorteile

in europäischen Kontexten dokumentierten. Die Module könnten die Bodentemperatur und die Evapotranspiration senken und somit die Wasserverwendung effizienter machen. Das Mikroklima unter den Modulen könnte die direkte Befeuchtung der Pflanzen durch Regen oder Tau verringern und somit ungünstige Bedingungen für Krankheitserreger wie *Venturia inaequalis* schaffen. Dadurch wird der Bedarf an Pflanzenschutzmitteln gesenkt. Zusätzlich bieten die Module thermoregulierenden Schutz vor Spätfrösten und senken den Wasserbedarf der Pflanzen. Diese Ergebnisse erweitern die Arbeit von Marrou et al. (2013), in der mikroklimatische Vorteile unter APV-Systemen für Gemüsekulturen dokumentiert wurden, auf mehrjährige Obstbaumsysteme in semi-ariden Regionen. Ein reduzierter Bedarf an Pflanzenschutzmitteln trägt zur ökologischen Nachhaltigkeit des Systems bei – ein Aspekt, der in konventionellen LCOE-Berechnungen oft nicht berücksichtigt wird.

Das für Midelt entwickelte, technische Konzept ist zwar grundsätzlich auf andere semi-aride Regionen Marokkos übertragbar, erfordert jedoch standortspezifische Anpassungen, etwa bei der Modulausrichtung, der Speicherkapazität und der Kulturauswahl. Diese Einschätzung stützt sich auf die Analyse von Majumdar und Pasqualetti (2018), die das Potenzial von APV in unterschiedlichen Klimazonen untersuchten, jedoch nur begrenzt konkrete Hinweise zu Designanpassungen für obstbauliche Systeme in semi-ariden Regionen gaben. Die Fallstudie deutet darauf hin, dass im Apfelanbau trotz der Beschattung durch die PV-Module nur mit geringen Ertragseinbußen zu rechnen ist. Aufgrund der sehr hohen solaren Einstrahlung vor Ort ($1.969 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$) ist davon auszugehen, dass die PAR auch unter den Modulen weitgehend ausreicht, um das Ertragspotenzial nahezu vollständig auszuschöpfen. Mögliche minimale Ertragseinbußen könnten zudem durch Einsparungen beim Pflanzenschutz – hauptsächlich durch die potenzielle Reduktion von Apfelschorf – sowie durch Schutzwirkungen gegenüber Extremwetterereignissen kompensiert oder sogar übertroffen werden. Selbst unter konservativen wirtschaftlichen Annahmen, beispielsweise bei einem Strompreis von $0,10 \text{ €/kWh}$, zeigt das APV-System ein robustes Wirtschaftlichkeitsprofil. Der Erfolg einer breiteren Anwendung hängt jedoch weiterhin maßgeblich von Faktoren wie den Anfangsinvestitionen, staatlicher Förderung und institutionellen Rahmenbedingungen ab. Dies sind auch die zentralen Herausforderungen, die von Pascaris et al. (2021) identifiziert wurden.

Basierend auf dem marokkanischen Netzemissionsfaktor von ca. $0,671 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh}$ kann das in dieser Studie vorgeschlagene 1 ha APV-System mit einem

geschätzten Jahresertrag von 1.359 MWh jährlich ca. 911 Tonnen CO₂-Äquivalente einsparen - ein konkreter lokaler Beitrag zur Erreichung der nationalen Klimaziele (Bennouna 2024). Hochgerechnet auf einen landesweiten Einsatz könnten APV-Anlagen bereits auf einer Fläche von nur 1.000 Hektar fast eine Million Tonnen CO₂ pro Jahr einsparen. Darüber hinaus bieten APV-Systeme wirtschaftliche Chancen für ländliche Gemeinden, etwa durch neue Einkommensquellen, lokale Wertschöpfung und dezentrale Energieversorgung. Die hohen Anfangsinvestitionen und der technische Wartungsbedarf sind jedoch noch Hindernisse für eine flächendeckende Einführung. Politische Unterstützung in Form von Subventionen, rechtliche Klarheit sowie internationale Partnerschaften - etwa mit der EU, der Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) oder der Weltbank - sind entscheidend, um APV als Schlüsseltechnologie für die nachhaltige Entwicklung Marokkos zu etablieren.

Auf sozialer Ebene birgt APV ein erhebliches Transformationspotenzial. Neben neuen Einkommensquellen durch den Stromverkauf und Beschäftigungseffekten im Anlagenbau kann die dezentrale Energieversorgung zur wirtschaftlichen Stärkung ländlicher Räume beitragen. Für eine breite gesellschaftliche Akzeptanz sind jedoch partizipative Modelle erforderlich, die auch benachteiligte Gruppen wie Kleinbauern oder Frauen einbeziehen. Eine fundierte Planung sollte zudem ökologische Risiken wie Eingriffe in das Landschaftsbild oder Recyclingprobleme der Module adressieren. Neue Start-ups bieten ein nahezu 90%iges Recycling der Module an (intersolar 2024). Langfristig ist die Einbindung in regionale Entwicklungsstrategien einschließlich Governance- und Monitoringstrukturen entscheidend, um ökologische und soziale Synergien zu sichern. Insgesamt zeigt sich APV als multifunktionale Lösung, die einen Beitrag zur nachhaltigen Landnutzung, zur Klimaanpassung sowie zur sozioökonomischen Entwicklung ländlicher Räume leisten kann - vorausgesetzt, diese Potenziale werden systematisch genutzt.

Auch empirische Langzeitdaten zu den agronomischen und energetischen Effekten in Marokko fehlen noch weitgehend. Darüber hinaus müssen die institutionellen und regulatorischen Rahmenbedingungen verbessert werden, vor allem durch klare Einspeiseregulungen und attraktive Vergütungsmechanismen, die Investitionssicherheit bieten. Zukünftige Forschung sollte darüber hinaus innovative Finanzierungs- und Geschäftsmodelle entwickeln, um die Skalierung von APV-Projekten zu fördern, sowie Kooperationsmodelle zwischen Landwirten, Energieversorgern und öffentlichen Institutionen weiter untersuchen.

Diese Studie zeigt die Möglichkeit und Machbarkeit der Anwendung von APV nicht nur im Apfelanbau in Marokko, sondern auch in einer Vielzahl anderer landwirtschaftlicher Kulturen. Die Grundidee besteht darin, landwirtschaftliche Flächen sowohl für die Nahrungsmittelproduktion als auch für die Erzeugung von Solarenergie zu nutzen. Die Technologie ist flexibel und bietet Potenzial für viele verschiedene Kulturen wie Obstplantagen, Gemüsefelder, Getreideanbau und Weinbau. Die Konfiguration des APV-Systems kann an die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Kultur angepasst werden. Beispielsweise kann für schattentolerante Kulturen eine dichtere Anordnung der Photovoltaikmodule sinnvoll sein, während für Kulturen mit hohem Lichtbedarf größere Reihenabstände oder transparentere Module vorteilhaft sein können. Das Hauptziel besteht darin, die Pflanzen vor extremen Wetterbedingungen zu schützen und gleichzeitig erneuerbare Energie zu erzeugen. APV hat das Potenzial, in verschiedenen Klimazonen und Anbausystemen weltweit zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit der Landwirtschaft gegenüber dem Klimawandel beizutragen und die nachhaltige Nutzung von Ressourcen zu fördern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese Studie das APV-Forschungsfeld voranbringt. Sie demonstriert, dass die Integration komplementärer Technologien wie RWH und Energiespeicherung die technische Machbarkeit verbessert und erhebliche agrarökologische sowie wirtschaftliche Vorteile bietet. Im Vergleich zur bestehenden Literatur erweitert diese Analyse durch den Einbezug von Regenwassermanagement und Sektorenkopplung in Form von Batteriespeichern das Spektrum potenzieller Synergieeffekte und leistet einen Beitrag zur Entwicklung ganzheitlicher Ansätze für eine nachhaltige Landnutzung unter den Bedingungen des Klimawandels. Die Ergebnisse bieten wertvolle Einblicke in die bisherige Forschung, indem sie spezifische Vorteile quantifizieren, die in früheren Studien häufig genannt, aber selten gemessen wurden, wie etwa das Potenzial der Wassergewinnung und der reduzierte Pflanzenschutzbedarf. Darüber hinaus erweitert die Wirtschaftlichkeitsanalyse die Bewertung, indem sie diese zusätzlichen Co-Benefits in das gesamte Wertversprechen von APV-Systemen in wasserarmen Agrarregionen einbezieht.

Literaturverzeichnis

Achraf, Abdelhak; Boudhar, Said; Lechheb, Houda; Ouakil, Hicham (2021): Sectoral water footprint dynamics: An input-output structural decomposition analysis for Morocco. In: *E3S Web of Conferences* 234, S. 41. DOI: 10.1051/e3sconf/202123400041.

Aenverde (2024): Marruecos prevé alcanzar el millón de hectáreas con riego localizado en 2030 - A en verde - Medio de información de agricultura. Online verfügbar unter <https://www.aenverde.es/marruecos-preve-alcanzar-el-millon-de-hectareas-con-riego-localizado-en-2030/>, zuletzt aktualisiert am 28.06.2024, zuletzt geprüft am 30.01.2025.

Agostini, Alessandro; Colauzzi, Michele.; Amaducci, Stefano (2021): Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment. In: *Applied Energy* 281, S. 116102. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116102.

agrarheute (2024): 500 ha groß: Hier entsteht Europas größte Agri-PV-Anlage. Online verfügbar unter <https://www.agrarheute.com/energie/strom/500-ha-gross-entsteht-europas-groesste-agri-pv-anlage-625690>, zuletzt aktualisiert am 07.09.2024, zuletzt geprüft am 17.04.2025.

Agrimaroc (2019): Le pommier génère des bénéfices de 150.000 DH/ha. Online verfügbar unter <https://www.agrimaroc.ma/pommier-benefices/>, zuletzt aktualisiert am 26.03.2019, zuletzt geprüft am 08.05.2025.

Agrimaroc (2020): Fès-Meknès: La grêle endommage plus de 9.000 hectares de cultures. In: *AGRIMAROC*, 08.06.2020. Online verfügbar unter <https://www.agrimaroc.ma/fes-meknes-grele-cultures/>, zuletzt geprüft am 13.12.2024.

Agrimaroc (2021): Les différentes techniques d'irrigation. Online verfügbar unter <https://www.agrimaroc.ma/les-differentes-techniques-d-irrigation/>, zuletzt aktualisiert am 06.12.2021, zuletzt geprüft am 30.01.2025.

Agrimaroc (2024): Le secteur agricole au Maroc. Online verfügbar unter <https://www.agrimaroc.ma/secteur-agricole-au-maroc/>, zuletzt aktualisiert am 11.07.2024, zuletzt geprüft am 28.01.2025.

Ahmed, Jubaer (2024): Chapter Eighteen - Photovoltaic-powered vehicles: Current trends and future prospects. In: Senthilarasu Sundaram, Velumani Subramaniam, Ryne P. Raffaele, Mohammad Khaja Nazeeruddin, Arturo Morales-Acevedo, María Bernechea Navarro und Aloysius F. Hepp (Hg.): *Photovoltaics Beyond Silicon : Solar Cell Engineering*: Elsevier, S. 647–674. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323901888000191>.

Ahmed, Mohamed; Aqnouy, Mourad; Stitou El Messari, Jamal (2021): Sustainability of Morocco's groundwater resources in response to natural and anthropogenic forces. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169421009161>, zuletzt aktualisiert am 03.02.2025, zuletzt geprüft am 03.02.2025.

Al Garni, Hassan Zuhair; Awasthi, Anjali; Wright, David (2019): Optimal orientation angles for maximizing energy yield for solar PV in Saudi Arabia. In: *Renewable Energy* 133, S. 538–550. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.048.

Alam, Habeel; Butt, Nauman Zafar (2024): How does module tracking for agrivoltaics differ from standard photovoltaics? Food, energy, and technoeconomic implications. In: *Renewable Energy* 235, S. 121151. DOI: 10.1016/j.renene.2024.121151.

Alemayehu, Mintesinot; Admasu, Bimrew Tamrat (2023): Passive solar tracker using a bimetallic strip activator with an integrated night return mechanism. In: *Heliyon* 9 (7), e18174. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18174.

Algarra, Jose Antonio; Cariñanos González, Paloma; Herrero Lantarón, Javier; Delgado-Capel, Manuel José; Ramos Lorente, María Del Mar; Díaz De La Guardia Guerrero, Consuelo (2019): Tracking Montane Mediterranean grasslands: Analysis of the effects of snow with other related hydro-meteorological variables and land-use change on pollen emissions. In: *The Science of the total environment* 649, S. 889–901. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.311.

Alnaqbi, Shaima; Alasad, Shamma; Aljaghoub, Haya; Alami, Abdul; Abdelkareem, Mohammad; Olabi, Abdul (2022): Applicability of Hydropower Generation and Pumped Hydro Energy Storage in the Middle East and North Africa. In: *Energies* 15 (7), S. 2412. DOI: 10.3390/en15072412.

Amachraa, Abdelmonim (2023): Navigating Morocco's Agricultural Policy: Unraveling the Nexus of Water, Food Security, and Trade Tensions in Global Value Chains. DOI: 10.20944/preprints202307.0604.v1.

Amaducci, Stefano; Yin, Xinyou; Colauzzi, Michele (2018): Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. In: *Applied Energy* 220, S. 545–561. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.081.

Annigoni, Eleonora; Virtuani, Alessandro; Caccivio, Mauro; Friesen, Gabi; Chiavese, Domenico; Ballif, Christophe (2019): 35 years of photovoltaics: Analysis of the TISO-10-kW solar plant, lessons learnt in safety and performance—Part 2. In: *Progress in Photovoltaics* 27 (9), S. 760–778. DOI: 10.1002/pip.3146.

ANR (2022): Smart Agrivoltaic Systems for Fruits. Agence nationale de la recherche. Online verfügbar unter <https://anr.fr/Project-ANR-23-LERE-0006>, zuletzt aktualisiert am 17.04.2025, zuletzt geprüft am 17.04.2025.

ANRE (2022): Rapport Annuel 2022 ANRE. Autorité Nationale de Régulation de l'Electricité. Online verfügbar unter https://anre.ma/wp-content/uploads/2023/12/FR-Rapport-Annuel-2022-ANRE-1_compressed.pdf, zuletzt geprüft am 30.11.2024.

Antonini, Piergiorgio (2013): Concentrated PhotoVoltaics (CPV): Is it a real opportunity? In: *EPJ Web of Conferences* 54, S. 1015. DOI: 10.1051/epjconf/20135401015.

Apriani, Santi; Mangkuto, Rizki Armanto; Saputro, Adhitya Gandaryus; Chow, Edward Christopher. (2024): Performance prediction and optimisation of even-lighting agrivoltaic systems with semi-transparent PV module in the tropical region. In: *Solar Energy* 283, S. 113013. DOI: 10.1016/j.solener.2024.113013.

Arabi, Mourad; Mechkirrou, Latifa; El Malki, Mohamed; Alaoui, Karima; Chaieb, Amine; Maaroufi, Fatiha; Karmich, Saida (2024): Overview of Ecological Dynamics in Morocco – Biodiversity, Water Scarcity, Climate Change, Anthropogenic Pressures, and Energy Resources – Navigating Towards Ecosolutions and Sustainable Development. In: *E3S Web of Conferences* 527, S. 1001. DOI: 10.1051/e3sconf/202452701001.

Arredondas, Margarita (2024): Le Maroc va étendre l'irrigation à un million d'hectares d'ici à 2030. In: *Atalayar*, 28.07.2024. Online verfügbar unter <https://www.atalayar.com/fr/articulo/societe/maroc-va-etendre-lirrigation-million-dhectares-dici-2030/20240728080000203326.html>, zuletzt geprüft am 12.12.2024.

Asa'a, Shu-Ngwa; Reher, Thomas; Rongé, Jan; Diels, Jan; Poortmans, Jef; Radhakrishnan, Hariharsudan Sivaramakrishnan et al. (2024): A multidisciplinary view on agrivoltaics: Future of energy and agriculture. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 200, S. 114515. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114515.

Assem, Najat; Elharrani, Hanae; El Haouari, Mohammed; El Hafid, Latifa; Chaaouan, Jamal (2021): Impact Of Climate Change On The Phytobiodiversity Of Tazekka National Park. In: *Sustainability in Environment* 6 (2), p1. DOI: 10.22158/se.v6n2p1.

Assiene Mouodo, Luc Vivien; Ali, AbdeL-Hamid Mahamat; Olivier Thierry, Sosso Mayi; Moteyo, Alvine Donfang; Gaston Tamba, Jean; Axaopoulos, Petros (2024): Comparison and classification of photovoltaic system architectures for limiting the impact of the partial shading phenomenon. In: *Heliyon* 10 (17), e36670. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e36670.

Azeroual, Mohamed; El Makrini, Aboubakr; El Moussaoui, Hassan; El Markhi, Hassane (2018): Renewable Energy Potential and Available Capacity for Wind and Solar Power in Morocco Towards 2030. In: *Journal of Engineering Science and Technology Review* 11 (1), S. 189–198. DOI: 10.25103/jestr.111.23.

Azougagh, Mohammed (2001): Matériel d'irrigation Choix, utilisation et entretien. Online verfügbar unter https://www.agrimaroc.net/bulletins/btta_81.pdf, zuletzt geprüft am 13.12.2024.

Bakkari, Mohammed; Bossoufi, Badre; El Kafazi, Ismail; Bouderbala, Manale; Karim, Mohammed (2023): A review of wind energy potential in Morocco: New challenges and perspectives. In: *Wind Engineering* 48 (1), S. 101–120. DOI: 10.1177/0309524X231200582.

Barron-Gafford, Greg A.; Pavao-Zuckerman, Mitchell A.; Minor, Rebecca L.; Suter, Leland F.; Barnett-Moreno, Isaiah; Blackett, Daniel T. et al. (2019): Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. In: *Nature Sustainability* 2 (9), S. 848–855. DOI: 10.1038/s41893-019-0364-5.

Batmunkh, Munkhbayar (2020): Advances in Emerging Solar Cells. In: *Nanomaterials* 10 (3), S. 534. DOI: 10.3390/nano10030534.

Bekri, My Hachem; El Hmaidi, Abdellah; Ousmana, Habiba; El Faleh, El Mati; Berada, Mohamed; El Aissaoui, Kamal et al. (2021): Weather drought index prediction using the support vector regression in the Ansegmir Watershed, Upper Moulouya, Morocco. In: *Journal of Water and Land Development* 50 (null), S. 187–194. Online verfügbar unter <https://bibliotekanauki.pl/articles/1841959>.

Bellini, Emiliano (2020): Cooling down PV panels with water. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine-india.com/2020/04/01/cooling-down-pv-panels-with-water/>, zuletzt aktualisiert am 07.05.2025, zuletzt geprüft am 07.05.2025.

Benbba, Rania; Barhdadi, Majd; Ficarella, Antonio; Manente, Giovanni; Romano, Maria Pia; El Hachemi, Nizar et al. (2024): Solar Energy Resource and Power Generation in Morocco: Current Situation, Potential, and Future Perspective. In: *Resources* 13 (10), S. 140. DOI: 10.3390/resources13100140.

Bennouna, Abdelhak (2020): Gestion de l'eau au Maroc et changement climatique. Online verfügbar unter <https://openalex.org/works/w3159624353>, zuletzt aktualisiert am 13.01.2025, zuletzt geprüft am 21.01.2025.

Bennouna, Amin (2024): Émissions de gaz à effet de serre par l'électricité au Maroc en 2023: Unpublished. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/380485192_Emissions_de_gaz_a_effet_de_serre_par_l_electricite_au_Maroc_en_2023.

Bennouna, Amin. (2023): The State of Energy in Morocco. Country report – Energy in Morocco 2022. Online verfügbar unter https://www.kas.de/documents/264147/264196/Report+Energy+Morocco+2022_Amin+Bennouna.pdf/db49a4e3-6505-aaf3-85af-775b57d49d08?version=1.0&t=1683651907984, zuletzt geprüft am 08.11.2023.

Berrian, Djaber; Chhapia, Gaurang; Linder, Johannes (2025): Performance of land productivity with single-axis trackers and shade-intolerant crops in agrivoltaic systems. In: *Applied Energy* 384, S. 125471. DOI: 10.1016/j.apenergy.2025.125471.

blechshop24 (o. J.): Regenwasserklappen, Verteiler, Sammler. Online verfügbar unter <https://blechshop24.com/fallrohre/regenwasserklappen-verteiler-sammler/>, zuletzt aktualisiert am 09.05.2025, zuletzt geprüft am 09.05.2025.

Borja Block, Alejandro; Escarre Palou, Jordi; Courtant, Marie; Virtuani, Alessandro; Cattaneo, Gianluca; Roten, Maxime et al. (2024): Colouring solutions for building integrated photovoltaic modules: A review. In: *Energy and Buildings* 314, S. 114253. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114253.

Bouichou, El Houssain; Fadlaoui, Aziz; Bouayad, Abdelghani; Allali, Khalil (2024): An hedonic evaluation of the impacts of vertical coordination on business performance amongst apple producers in Morocco. In: *Heliyon* 10 (6), e27745. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27745.

Boulakhbar, Mouaad; Lebrouhi, Badr Eddine; Kousksou, Tarik; Smouh, Slimane; Jamil, Abdelmajid; Maaroufi, Mohamed; Zazi, Malika. (2020): Towards a large-scale integration of renewable energies in Morocco. In: *Journal of Energy Storage* 32, S. 101806. DOI: 10.1016/j.est.2020.101806.

Bourisli, Raed I.; Zaher, Fatema A.; Aldalali, Bader S. (2024): Reducing the operating temperature and improving the efficiency of PV modules using guiding vanes. In: *Solar Energy* 269, S. 112345. DOI: 10.1016/j.solener.2024.112345.

Bousi, Erion (2024): Rainwater Harvesting in Agrivoltaic Systems, as presented at Fraunhofer ISE Lecture series.

Brouziyne, Youssef (2021): Morocco's agricultural system response to the dual shock of the COVID-19 crisis and drought: learnings and recommendations for the new normal. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/352861525_Morocco's_agricultural_system_response_to_the_dual_shock_of_the_COVID-19_crisis_and_drought_learnings_and_recommendations_for_the_new_normal, zuletzt aktualisiert am 02.04.2025, zuletzt geprüft am 02.04.2025.

Bruno, Maddalena; Gfüllner, Leonhard J.; Berwind, Matthew F. (2025): Enhancing agrivoltaic synergies through optimized tracking strategies. In: *Journal of Photonics for Energy* 15 (03), S. 32703. DOI: 10.1117/1.JPE.15.032703.

Callesen, Ole (1989): Comparison of Apple Rootstocks M27, M9, and M26 at two densities. In: *Acta Horticulturae* (243), S. 79–82. DOI: 10.17660/ActaHortic.1989.243.8.

Carlos Pérez Mejía, Yan; Wesly Camacho, Jack Wesly Camacho; Magallanes-Galla, Gualberto; Mariano, Deyslen; J. Taveras Cruz, Armando; Sbriz-Zeitun, Giuseppe; Aybar Mejía, Miguel (2023): Implementation of Agrivoltaic Systems under

Operating Photovoltaic Park Conditions. Conference: Vi Iberoamerican Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2023). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/377591033_Implementation_of_Agrivoltaic_Systems_under_Operating_Photovoltaic_Park_Conditions, zuletzt aktualisiert am 20.04.2025, zuletzt geprüft am 20.04.2025.

Ceballos, Maria de los Angeles; Pérez-Higueras, Pedro Jose; Fernández, Eduardo F.; Almonacid, Florencia (2023): Tracking-Integrated CPV Technology: State-of-the-Art and Classification. In: *Energies* 16 (15), S. 5605. DOI: 10.3390/en16155605.

Chaabi, Chady (2025): Les bassins d'irrigation, un atout pour l'agriculture à l'épreuve de l'évaporation (infographies). Online verfügbar unter <https://medias24.com/2025/01/21/les-bassins-dirrigation-un-atout-pour-lagriculture-a-lep-reuve-de-levaporation-infographies/>, zuletzt aktualisiert am 22.01.2025, zuletzt geprüft am 09.05.2025.

Chalgynbayeva, Aidana; Gabnai, Zoltán; Lengyel, Péter; Pestisha, Albiona; Bai, Attila (2023): Worldwide Research Trends in Agrivoltaic Systems—A Bibliometric Review. In: *Energies* 16 (2), S. 611. DOI: 10.3390/en16020611.

Chegari, Badr (2022): Contribution à l'intégration de systèmes de gestion optimale de l'énergie pour les bâtiments intelligents. Université Grenoble Alpes [2020-...] Université Hassan II (Casablanca, Maroc), 2022. Online verfügbar unter <https://theses.hal.science/tel-03852443/>.

Choukri, Karim; Naddami, Ahmed; Hayani, Sanaa (2017): Renewable energy in emergent countries: lessons from energy transition in Morocco. In: *Energy, Sustainability and Society* 7 (1), S. 1–11. DOI: 10.1186/s13705-017-0131-2.

Cinderby, Steve; Parkhill, Karen A.; Langford, Stephen; Muhoza, Cassilde (2024): Harnessing the sun for agriculture: Pathways to the successful expansion of Agrivoltaic systems in East Africa. In: *Energy Research & Social Science* 116, S. 103657. DOI: 10.1016/j.erss.2024.103657.

ClimateData (2025): Climat Midelt: Pluviométrie et Température moyenne Midelt, diagramme ombrothermique pour Midelt. Online verfügbar unter <https://fr.climate-data.org/afrique/maroc/midelt/midelt-21514/>, zuletzt aktualisiert am 09.05.2025, zuletzt geprüft am 11.05.2025.

Conseil de la concurrence (2024): Avis du Conseil de la concurrence n° A/1/24. Online verfügbar unter <https://conseil-concurrence.ma/wp-content/uploads/2024/04/AVIS-A-1-24-FR-WEB.pdf>, zuletzt geprüft am 30.11.2024.

Cossu, Marco; Tiloca, Maria Teresa; Cossu, Andrea; Deligios, Paola A.; Pala, Tore; Ledda, Luigi (2023): Increasing the agricultural sustainability of closed agrivoltaic systems with the integration of vertical farming: A case study on baby-leaf lettuce. In: *Applied Energy* 344, S. 121278. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121278.

Cuevas, Andres M.; Luque, Antonio; Eguren, Javier; Del Alamo, Jesus A. (1982): 50 Per cent more output power from an albedo-collecting flat panel using bifacial solar cells. In: *Solar Energy* 29 (5), S. 419–420. DOI: 10.1016/0038-092X(82)90078-0.

Dachrinnen-Shop GmbH (o. J.): Titanzink Dachrinne halbrund RG280 Länge 1,0 Meter - Dachrinnen-Shop GmbH. Online verfügbar unter <https://www.dachrinnen-shop.de/>, zuletzt aktualisiert am 09.05.2025, zuletzt geprüft am 09.05.2025.

D'Adamo, Idiano; Gastaldi, Massimo; Luthra, Sunil; Rimoldi, Leonardo (2024): Ag-risolar, incentives and sustainability: Profitability analysis of a photovoltaic system integrated with a storage system. In: *Energy Reports* 12, S. 251–258. DOI: 10.1016/j.egyr.2024.06.033.

Dallaev, Rashid; Pisarenko, Tatiana; Papež, Nikola; Holcman, Vladimír (2023): Overview of the Current State of Flexible Solar Panels and Photovoltaic Materials. In: *Materials* 16 (17), S. 5839. DOI: 10.3390/ma16175839.

Darwesh, Nabil; Naser, Ramzy S. M.; Al-Qawati, Mohammed; Raweh, Shaker; El Kharrim, Khadija; Belghyti, Driss (2020): Groundwater Quality in Sidi Slimane, Morocco. In: *Journal of Health & Pollution* 10 (25), S. 200309. DOI: 10.5696/2156-9614-10.25.200309.

Detweiler, Angela M.; Mioni, Cécile E.; Hellier, Katie L.; Allen, Jordan J.; Carter, Sue A.; Bebout, Brad M. et al. (2015): Evaluation of wavelength selective photovoltaic panels on microalgae growth and photosynthetic efficiency. In: *Algal Research* 9, S. 170–177. DOI: 10.1016/j.algal.2015.03.003.

Deutsches Institut für Normung e.V. (2021): DIN SPEC 91434 Agri-Photovoltaik-Anlagen - Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung. Online verfügbar unter <https://www.din.de/de/wdc-beuth:din21:337886742>, zuletzt aktualisiert am 19.04.2025, zuletzt geprüft am 19.04.2025.

DGM (2024): Maroc Etat du Climat en 2023. Direction générale de la Météorologie. Online verfügbar unter https://www.marocmeteo.ma/sites/default/files/climat_report/pdfs/Maroc_Etat_Climat_2023.pdf, zuletzt geprüft am 13.12.2024.

dhp technology AG (o. J.): Das Solarfaltdach HORIZON – weltweit einzigartig und mehrfach ausgezeichnet. Online verfügbar unter <https://www.dhp-technology.ch/produkt-solarfaltdach-horizon>.

Ding, Don; Lu, Guilin; Li, Zhengping; Zhang, Yueheng; Shen, Wenzhong (2019): High-efficiency n-type silicon PERT bifacial solar cells with selective emitters and poly-Si based passivating contacts. In: *Solar Energy* 193, S. 494–501. DOI: 10.1016/j.solener.2019.09.085.

Doedt, Christian; Tajima, Makoto; Iida, Tetsunari (2022): Agrivoltaics in Japan. In: *Agrivoltaics Conference Proceedings* 1. DOI: 10.52825/agripv.v1i.533.

Duan, Leiping; Uddin, Ashraf (2020): Progress in Stability of Organic Solar Cells. In: *Advanced science (Weinheim, Baden-Wurttemberg, Germany)* 7 (11), S. 1903259. DOI: 10.1002/advs.201903259.

Dullweber, Thorsten; Schmidt, Jan (2016): Industrial Silicon Solar Cells Applying the Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) Concept—A Review. In: *IEEE Journal of Photovoltaics* 6 (5), S. 1366–1381. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2016.2571627.

Dupraz, Christian; Marrou, H        ; Talbot, Gr        ; Dufour, Lydie; Nogier, A.; Ferard, Yoann (2011): Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. In: *Renewable Energy* 36 (10), S. 2725–2732. DOI: 10.1016/j.renene.2011.03.005.

EastFruit (2023a): Morocco ranked third in the global tomato exports! Online verf         unter <https://east-fruit.com/en/trending/morocco-ranked-third-in-the-global-tomato-exports/>, zuletzt aktualisiert am 02.04.2025, zuletzt gepr       am 02.04.2025.

EastFruit (2023b): Top 10 facts about fruit and vegetable business in Morocco you might have never heard about. Online verf         unter <https://east-fruit.com/en/horticulture-market/studies/top-10-facts-about-fruit-and-vegetable-business-in-morocco-you-might-have-never-heard-about/>, zuletzt aktualisiert am 12.02.2025, zuletzt gepr       am 12.02.2025.

Ebhota, Williams S.; Tabakov, Pavel Ya (2023): Influence of photovoltaic cell technologies and elevated temperature on photovoltaic system performance. In: *Ain Shams Engineering Journal* 14 (7), S. 101984. DOI: 10.1016/j.asej.2022.101984.

Ed-daoudi, Rachid; Alaoui, Altaf; Ettaki, Badia; Zerouaoui, Jamal (2023): A Predictive Approach to Improving Agricultural Productivity in Morocco through Crop Recommendations. In: *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)* 14 (3). DOI: 10.14569/IJACSA.2023.0140322.

EIB (2022): Morocco: EIB supports Masen in assessing Morocco’s offshore wind energy potential. European Investment Bank. Online verf         unter <https://www.eib.org/en/press/all/2022-387-la-bei-soutient-masen-pour-l-evaluation-du-potentiel-eolien-offshore-du-maroc>, zuletzt aktualisiert am 30.09.2022, zuletzt gepr       am 02.12.2024.

EIT InnoEnergy (2022): Unlocking New Possibilities Through Innovative Energy Storage. The Role of Ultracapacitors in the Energy Transition | EIT. Online verf         unter <https://www.eit.europa.eu/library/unlocking-new-possibilities-through-innovative-energy-storage-role-ultracapacitors-energy>, zuletzt aktualisiert am 08.05.2025, zuletzt gepr       am 08.05.2025.

Ejjiar, Abdessamad; Arib, Fatima (2022): The Impact of Climate Change on Economic Growth in Developing Countries Case of Morocco. In: *International Journal of Accounting, Finance, Auditing, Management and Economics* 3(4-1), 354–367. DOI: 10.5281/ZENODO.6612549.

El Fartassi, Imane; Milne, Alice E.; El Alami, Rafiq; Rafiqi, Maryam; Hassall, Kirsty L.; Waine, Toby W. et al. (2023): Evidence of collaborative opportunities to ensure long-term sustainability in African farming. In: *Journal of Cleaner Production* 392, S. 136–170. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136170.

El Hafdaoui, Hamza; Khallaayoun, Ahmed; Ouazzani, Kamar (2024): Long-term low carbon strategy of Morocco: A review of future scenarios and energy measures. In: *Results in Engineering* 21, S. 101724. DOI: 10.1016/j.rineneng.2023.101724.

El Harrouni, Khalid; Kharmich, Hassane; Karibi, Khadija (2024): Traditional Earth Architecture as a Tool for Sustainability and Adaptation to Climate Change of Heat and Cold Extremes. In: *Materials Research Proceedings* 40, S. 218–225. DOI: 10.21741/9781644903117-23.

El Hasnaoui, Abdennebi; El Hilali, Abdessamad; Raki, Mohamed (2009): Les limites du programme national pour la promotion de l'irrigation localisée. In: Habib Ayeb und Thierry Ruf (Hg.): *Eaux, pauvreté et crises sociales*. Marseille: IRD Éditions, S. 653–666.

El Jaouhari, Nabil; Abouabdillah, Aziz; Bouabid, Rachid; Bouriou, Mohamed; Aleya, Lotfi; Chaoui, Mohamed (2018): Assessment of sustainable deficit irrigation in a Moroccan apple orchard as a climate change adaptation strategy. In: *The Science of the total environment* 642, S. 574–581. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.108.

El Khchine, Younes; Sriti, Mohammed; El Kadri Elyamani, Nacer Eddine (2019): Evaluation of wind energy potential and trends in Morocco. In: *Heliyon* 5 (6), e01830. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01830.

El Mekkaoui, Abdelali; Moussadek, Rachid; Mrabet, Rachid; Chakiri, Said; Douaik, Ahmed; Ghanimi, Ahmed; Zouahri, Abdelmjid (2021): The conservation agriculture in northwest of Morocco (Merchouch area): The impact of no-till systems on physical properties of soils in semi-arid climate. In: *E3S Web of Conferences* 234, S. 37. DOI: 10.1051/e3sconf/202123400037.

Elalaoui, Ouahiba; Fadlaoui, Aziz; Maatala, Nassreddine; Ibrahimy, Abdelouafi (2021): Agriculture and GDP Causality Nexus in Morocco: Empirical Evidence from a VAR Approach. In: *International Journal of Agricultural Economics* 6 (4), S. 198. DOI: 10.11648/j.ijae.20210604.17.

Elouadi, Ihssan; Ouazar, Driss; El Youssfi, Lahcen (2020): A decision support model to improve water resources management in agriculture: evaluation of the drip irrigation efficiency in the Ait Ben Yacoub region, East of Morocco. In: *E3S Web of Conferences* 183, S. 2006. DOI: 10.1051/e3sconf/202018302006.

Emmott, Christopher J. M.; Röhr, Jason A.; Campoy-Quiles, Mariano; Kirchartz, Thomas; Urbina, Antonio; Ekins-Daukes, Nicholas J.; Nelson, Jenny (2015):

Organic photovoltaic greenhouses: a unique application for semi-transparent PV? In: *Energy & Environmental Science* 8 (4), S. 1317–1328. DOI: 10.1039/C4EE03132F.

Epule Epule, Terence; Poirier, Vincent; Lafontaine, Simon; Jemo, Martin; Dhiba, Driss; Kechchour, Ayoub et al. (2023): Recent Trends in the Yield-Nutrient-Water Nexus in Morocco. DOI: 10.5772/intechopen.112552.

Ernst, Marco; Liu, Xing; Asselineau, Charles-Alexis; Chen, Daniel; Huang, C.; Lennon, Alison (2024): Accurate modelling of the bifacial gain potential of rooftop solar photovoltaic systems. In: *Energy Conversion and Management* 300, S. 117947. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117947.

Et-Touile, Houria (2023): Water Scarcity impacts on Food production in Morocco. In: *International Journal of Strategic Management and Economic Studies (IJSMES)* 2 (5), S. 1640–1653. DOI: 10.5281/zenodo.8355193.

FAO (2023): Maroc | Efficacité, productivité et durabilité de l'eau dans la région NENA. Food and Agriculture Organization. Online verfügbar unter <https://www.fao.org/in-action/water-efficiency-nena/countries/morocco/fr/>, zuletzt aktualisiert am 13.11.2023, zuletzt geprüft am 13.11.2023.

Favi, Segbedji Geraldo; Adamou, Rabani; Godjo, Thierry; Giri, Nimay Chandra; Kuleape, Richmond; Trommsdorff, Max (2024): Agrivoltaic systems offer symbiotic benefits across the water-energy-food-environment nexus in West Africa: A systematic review. In: *Energy Research & Social Science* 117, S. 103737. DOI: 10.1016/j.erss.2024.103737.

Faysse, Nicolas (2015): The rationale of the Green Morocco Plan: missing links between goals and implementation. In: *The Journal of North African Studies* 20 (4), S. 622–634. DOI: 10.1080/13629387.2015.1053112.

Felsberger, Richard; Buchroithner, Armin; Gerl, Bernhard; Wegleiter, Hannes (2020): Conversion and Testing of a Solar Thermal Parabolic Trough Collector for CPV-T Application. In: *Energies* 13 (22), S. 6142. DOI: 10.3390/en13226142.

Fernández-Solas, Álvaro; Fernández-Ocaña, Ana M.; Almonacid, Florencia; Fernández, Eduardo F. (2023): Potential of agrivoltaics systems into olive groves in the Mediterranean region. In: *Applied Energy* 352, S. 121988. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121988.

FFEM (2025): Agrivoltaic solutions to generate electricity and reduce water stress | FFEM - Fonds Français pour l'Environnement Mondial. Online verfügbar unter <https://www.ffem.fr/en/carte-des-projets/agrivoltaic-solutions-generate-electricity-and-reduce-water-stress>, zuletzt aktualisiert am 17.04.2025, zuletzt geprüft am 17.04.2025.

Filahi, Said; Trambly, Yves; Mouhir, Latifa; Diaconescu, Emilia Paula (2017): Projected changes in temperature and precipitation indices in Morocco from high-

resolution regional climate models. In: *International Journal of Climatology* 37 (14), S. 4846–4863. DOI: 10.1002/joc.5127.

Fraunhofer ISE (2025): Agri-Photovoltaik in Kombination mit Witterungsschutz. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2025/agri-photovoltaik-in-kombination-mit-witterungsschutz.html>, zuletzt aktualisiert am 20.04.2025, zuletzt geprüft am 20.04.2025.

Fraunhofer ISE (o. J.): APV-MaGa – Agri-Photovoltaik für Mali und Gambia: Nachhaltige Stromproduktion durch integrierte Nahrungsmittel-, Energie- und Wassersysteme. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/apv-maga.html>, zuletzt aktualisiert am 19.04.2025, zuletzt geprüft am 19.04.2025.

Fraunhofer ISE (2016): Photovoltaik und Photosynthese – Pilotanlage am Bodensee kombiniert Strom- und Nahrungsmittelproduktion. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2016/photovoltaik-und-photosynthese-pilotanlage-am-bodensee-kombiniert-strom-und-nahrungsmittelproduktion.html>, zuletzt aktualisiert am 20.04.2025, zuletzt geprüft am 20.04.2025.

Fraunhofer ISE (2017): Harvesting the Sun for Power and Produce – Agrophotovoltaics Increases the Land Use Efficiency by over 60 Percent. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2017/harvesting-the-sun-for-power-and-produce-agrophotovoltaics-increases-the-land-use-efficiency-by-over-60-percent.html>, zuletzt aktualisiert am 16.04.2025, zuletzt geprüft am 16.04.2025.

Fraunhofer ISE (2018): Konzentrator-Photovoltaik mit höchster Effizienz – 41,4% Modulwirkungsgrad. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2018/konzentrator-photovoltaik-mit-hoechster-effizienz-41-komma-4-prozent-modulwirkungsgrad.html?utm_source=chatgpt.com, zuletzt aktualisiert am 19.04.2025, zuletzt geprüft am 19.04.2025.

Fraunhofer ISE (2019): Agrophotovoltaik: hohe Ernteerträge im Hitzesommer. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2019/agrophotovoltaik-hohe-ernteertraege-im-hitzesommer.html>, zuletzt aktualisiert am 19.04.2025, zuletzt geprüft am 19.04.2025.

Fraunhofer ISE (2023): Farbige PV-Module mit Fraunhofer ISE Patent erreichen Marktreife. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2023/farbige-pv-module-mit-fraunhofer-ise-patent-erreichen-marktreife.html>, zuletzt aktualisiert am 19.04.2025, zuletzt geprüft am 19.04.2025.

Fraunhofer ISE (2024a): Optimal getrackte PV-Anlagen durch Deep Learning. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2024/optimal-getrackte-pv-anlagen-durch-deep-learning.html>, zuletzt aktualisiert am 17.04.2025, zuletzt geprüft am 17.04.2025.

Fraunhofer ISE (2024b): Optimally Tracked PV Systems with Deep Learning. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/news/2024/optimally-tracked-pv-systems-with-deep-learning.html>, zuletzt aktualisiert am 22.04.2025, zuletzt geprüft am 22.04.2025.

FreshPlaza (2012): Morocco: Apple production in Midelt 190,000 tonnes. Online verfügbar unter <https://www.freshplaza.com/north-america/article/2101884/morocco-apple-production-in-midelt-190-000-tonnes/>, zuletzt aktualisiert am 06.05.2025, zuletzt geprüft am 06.05.2025.

FreshPlaza (2025): Bonne floraison des pommiers à Midelt. Online verfügbar unter <https://www.freshplaza.fr/article/9724748/bonne-floraison-des-pommiers-a-midelt/>, zuletzt aktualisiert am 06.05.2025, zuletzt geprüft am 06.05.2025.

Friman-Peretz, Maayan; Ozer, Shay; Geoola, Farhad; Magadley, Esther; Yehia, Ibrahim; Levi, Asher et al. (2020): Microclimate and crop performance in a tunnel greenhouse shaded by organic photovoltaic modules – Comparison with conventional shaded and unshaded tunnels. In: *Biosystems Engineering* 197, S. 12–31. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2020.06.007.

Galleani D'agliano, Alessandro (2024): Agrivoltaic Modeling : A Sector Overview. Online verfügbar unter <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1904753&dswid=-6542>.

García, Irene.; Leidreiter, Anna. (2016): Roadmap for a 100% renewable energy Morocco (Feuille de route pour un Maroc 100% energie renouvelable). World Future Council (in French). Online verfügbar unter https://www.worldfuturecouncil.org/wp-content/uploads/2016/10/WFC_2016_A-roadmap-for-100RE-in-Morocc_FR.pdf, zuletzt geprüft am 19.02.2024.

Garg, Renuka; Gonuguntla, Spandana; Sk, Saddam; Iqbal, Muhammad Saqlain; Dada, Adewumi Oluwasogo; Pal, Ujjwal; Ahmadipour, Mohsen (2024): Sputtering thin films: Materials, applications, challenges and future directions. In: *Advances in Colloid and Interface Science* 330, S. 103203. DOI: 10.1016/j.cis.2024.103203.

Ghezloun, Anissa; Saidane, Ali; Oucher, Nassima (2014): Energy Policy in the Context of Sustainable Development: Case of Morocco and Algeria. In: *Energy Procedia* 50, S. 536–543. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.06.065.

Ghosh, Aritra (2023): Nexus between agriculture and photovoltaics (agrivoltaics, agriphotovoltaics) for sustainable development goal: A review. In: *Solar Energy* 266, S. 112146. DOI: 10.1016/j.solener.2023.112146.

Global Market Insights Inc (2025a): Solar PV Tracker Market Share & Trends [2025-2033]. Online verfügbar unter <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/solar-pv-tracker-market-106530>.

Global Market Insights Inc. (2025b): Agrivoltaic Market Size, Growth Opportunity 2025-2034. Global Market Insights Inc. Online verfügbar unter <https://www.gminsights.com/industry-analysis/agrivoltaic-market>, zuletzt geprüft am 19.04.2025.

GlobalPetrolPrices (2025): Morocco electricity prices, September 2024 | Global-PetrolPrices.com. Online verfügbar unter https://www.globalpetrolprices.com/Morocco/electricity_prices/, zuletzt geprüft am 07.05.2025.

Goetzberger, Adolf; Zastrow, Armin (1981): Kartoffeln unter dem Kollektor.: In: *Sonnenenergie*, 1981, 3. Jg., Nr. 81, S. 19-22.

Gong, Wei; Zhang, Long; Gong, Jianhui; Geng, Xiayun; Wang, Li; Deng, Li et al. (2025): Regulatory effect of agriphotovoltaic systems with different panel heights on the thermal environment. In: *Scientific Reports* 15 (1), S. 11196. DOI: 10.1038/s41598-025-96166-5.

Gonocruz, Ruth Anne; Uchiyama, Shuichi; Yoshida, Yoshikuni (2022): Modeling of large-scale integration of agrivoltaic systems: Impact on the Japanese power grid. In: *Journal of Cleaner Production* 363, S. 132545. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132545.

Gopi, Chandu Venkata Veera Muralee; Ramesh, Ramamoorthy (2024): Review of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicles. In: *Results in Engineering* 24, S. 103598. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103598.

Gören, Aytaç (2017): Solar Energy Harvesting in Electro Mobility. In: *Energy Harvesting and Energy Efficiency* 37, S. 293–326. DOI: 10.1007/978-3-319-49875-1_11.

Gorjian, Shiva; Bousi, Erion; Özdemir, Özal Emre; Trommsdorff, Max; Kumar, Nallapaneni Manoj; Anand, Abhishek et al. (2022): Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158, S. 112126. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112126.

Guerrero-Lemus, Ricardo; Vega, Rolando E.; Kim, Taehyeon; Kimm, Amy; Shephard, Les E. (2016): Bifacial solar photovoltaics – A technology review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60, S. 1533–1549. DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.041.

Guo, Zhiqiu; Zhu, Ze; Liu, Ya; Wu, Changjun; Tu, Hao; Wang, Jianhua; Su, Xuping (2021): Closed-Surface Multifunctional Antireflective Coating Made from SiO₂ with TiO₂ Nanocomposites. In: *Materials* 14 (6), S. 1367. DOI: 10.3390/ma14061367.

Gush, Mark; Dzikiti, Sebinasi; van der Laan, Michael; Steyn, Maronel; Manamathela, Sibongile; Pienaar, Harrison (2019): Field quantification of the water footprint of an apple orchard, and extrapolation to watershed scale within a winter rainfall Mediterranean climate zone. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 271, S. 135–147. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.02.042.

Hachem, Abdelaziz; El-Mostafa, Mili; Benbella, Bouchra; El Ouardi, Hmidou; Mehdaoui, Radouan (2023): Characterization of Climatic Drought Sequences in the Upper Moulouya Watershed, Morocco. In: *Ecological Engineering & Environmental Technology* 24 (2), S. 162–179. DOI: 10.12912/27197050/157036.

Haidi, Touria; Cheddadi, Bouchra; El Mariami, Faissal; El Idrissi, Zineb; Tarrak, Ali (2021): Wind energy development in Morocco: Evolution and impacts. In: *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* 11 (4), S. 2811. DOI: 10.11591/ijece.v11i4.pp2811-2819.

Hammad, Bashar; Al-Sardeah, Ali; Al-Abed, Mohammad; Nijmeh, Salem; Al-Ghandoor, Ahmed (2017): Performance and economic comparison of fixed and tracking photovoltaic systems in Jordan. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80, S. 827–839. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.241.

Harbouze, Rachid; Pellissier, Jean-Pierre; Rolland, Jean-Pierre; Khechimi, Wided (2019): Rapport de synthèse sur l'agriculture au Maroc. CIHEAM-IAMM - Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes - Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier. Online verfügbar unter <https://hal.science/hal-02137637v2>.

Hashemi, Behzad; Taheri, Shamsodin; Cretu, Ana-Maria; Pouresmaeil, Edris (2021): Systematic photovoltaic system power losses calculation and modeling using computational intelligence techniques. In: *Applied Energy* 284, S. 116396. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116396.

Hassan, Qusay; Algburi, Sameer; Sameen, Aws Zuhair; Salman, Hayder M.; Jaszczur, Marek (2023): A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications. In: *Results in Engineering* 20, S. 101621. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101621.

Hassanpour Adeg, Elnaz; Selker, John S.; Higgins, Chad W. (2018): Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. In: *Public Library of Science ONE (PLOS ONE)* 13 (11), e0203256. DOI: 10.1371/journal.pone.0203256.

HCP (2020a): Les Brefs du Plan N° 14 - 18 Septembre 2020. Haut-Commissariat au Plan du Royaume du Maroc. Online verfügbar unter <https://www.hcp.ma/Les->

Brefs-du-Plan-N-14-18-Septembre-2020_a2590.html, zuletzt aktualisiert am 31.01.2025, zuletzt geprüft am 31.01.2025.

HCP (2020b): Monographie de la province de Midelt de l'année 2020. Haut-Commissariat au Plan du Royaume du Maroc. Online verfügbar unter <https://www.hcp.ma/draa-tafilalet/docs/monographies/Monographie%20de%20la%20province%20de%20Midelt%20de%20l%27%27annee%202020.pdf>, zuletzt geprüft am 06.05.2025.

HCP (2024): Population légale du Royaume du Maroc répartie par régions, provinces et préfectures et communes selon les résultats du Recensement général de la population et de l'habitat 2024. Haut-Commissariat au Plan du Royaume du Maroc. Online verfügbar unter https://www.hcp.ma/Population-legale-du-Royaume-du-Maroc-repartie-par-regions-provinces-et-prefectures-et-communes-selon-les-resultats-du_a3974.html, zuletzt aktualisiert am 06.05.2025, zuletzt geprüft am 06.05.2025.

Hermes, Wilfried; Waldmann, Daniel; Agari, Michaela; Schierle-Arndt, Kerstin; Erk, Peter (2015): Emerging Thin-Film Photovoltaic Technologies. In: *Chemie Ingenieur Technik* 87 (4), S. 376–389. DOI: 10.1002/cite.201400101.

Hernandez, Rebecca R.; Armstrong, Alona; Burney, Jennifer; Ryan, Greer; Moore-O'Leary, Kara; Diédhiou, Ibrahima et al. (2019): Techno–ecological synergies of solar energy for global sustainability. In: *Nature Sustainability* 2 (7), S. 560–568. DOI: 10.1038/s41893-019-0309-z.

Hickey, Thomas; Uchanski, Mark; Bousselot, Jennifer (2024): Vegetable crop growth under photovoltaic (PV) modules of varying transparencies. In: *Heliyon* 10 (16), e36058. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e36058.

Holechek, Jerry L.; Geli, Hatim M. E.; Sawalhah, Mohammed N.; Valdez, Raul (2022): A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050? In: *Sustainability* 14 (8), S. 4792. DOI: 10.3390/su14084792.

Hopf, Michaela (2021): Agri-Photovoltaik im Apfelanbau Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse am Fallbeispiel eines Bio-Obsthofes in Rheinland-Pfalz. Online verfügbar unter https://www.fh-erfurt.de/fileadmin/Dokumente/Personen/LGF/Wydra/MA-Thesis_Michaela_Hopf.pdf, zuletzt geprüft am 18.04.2025.

Hörnle, Oliver; Riedelsheimer, Julia; Trommsdorff, Maximilian; Keinath, Tobias; Binder, Florian; Weinmann, Ernst et al. (2021): Durchführbarkeitsstudie zur Ermittlung möglicher Forschung- und Demonstrationsfelder für Agri-Photovoltaik in Baden-Württemberg. DOI: 10.24406/publica-fhg-416837.

Hssaisoune, Mohammed; Bouchaou, Lhoussaine; Sifeddine, Abdelfattah; Bouime-tarhan, Ilham; Chehbouni, Abdelghani (2020): Moroccan Groundwater Resources and Evolution with Global Climate Changes. In: *Geosciences* 10 (2), S. 81. DOI: 10.3390/geosciences10020081.

Hughes, Philip D.; Fletcher, William J.; Bell, Benjamin A.; Braithwaite, Roger J.; Cornelissen, Henk L.; Fink, David; Rhoujjati, Ali (2020): Late Pleistocene glaciers to present-day snowpatches: a review and research recommendations for the Marrakech High Atlas. In: *Mediterranean Geoscience Reviews* 2 (1), S. 163–184. DOI: 10.1007/s42990-020-00027-4.

Hussain, Shanza Neda; Ghosh, Aritra (2024): Evaluating tracking bifacial solar PV based agrivoltaics system across the UK. In: *Solar Energy* 284, S. 113102. DOI: 10.1016/j.solener.2024.113102.

IEA (2010): Renewable Energy Essentials: Geothermal. International Energy Agency. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-essentials-geothermal>, zuletzt geprüft am 04.12.2024.

IEA (2019a): Energy Policies Beyond IEA Countries: Morocco 2019 Review. International Energy Agency. Online verfügbar unter https://iea.blob.core.windows.net/assets/138e3195-d0e6-4345-a66c-92ebe4ab-beaf/Energy_Policies_beyond_IEA_Countries_Morocco.pdf, zuletzt geprüft am 01.02.2025.

IEA (2019b): Morocco Renewable Energy Target 2030. International Energy Agency. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/policies/6557-morocco-renewable-energy-target-2030>, zuletzt aktualisiert am 02.12.2024, zuletzt geprüft am 02.02.2025.

IEA (2024): Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer. International Energy Agency. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>, zuletzt aktualisiert am 06.01.2024, zuletzt geprüft am 07.01.2025.

IFC (2023): IFC Guarantees Loan to Provide Farmers, Agribusiness SMEs in Morocco with Solar and Efficient Irrigation Systems. International Finance Corporation. Online verfügbar unter <https://www.ifc.org/en/pressroom/2023/ifc-guarantees-loan-to-provide-farmers-agribusiness-smes-in-morocco-with-solar-and-efficient-irrigation-systems>, zuletzt aktualisiert am 16.04.2025, zuletzt geprüft am 17.04.2025.

IHA (2024): Hydropower in Africa. International Hydropower Association. Online verfügbar unter <https://www.hydropower.org/region-profiles/africa>, zuletzt aktualisiert am 29.11.2024, zuletzt geprüft am 03.02.2025.

INRA (o. J.): Filière Maraîchage. Institut National de la Recherche Agronomique. Online verfügbar unter <https://www.inra.org.ma/fr/content/filiere-maraichage>, zuletzt aktualisiert am 13.02.2025, zuletzt geprüft am 13.02.2025.

INRA (1993): Carte des heures de froid du maroc. Institut National de la Recherche Agronomique. Online verfügbar unter <https://www.inra.org.ma/fr/content/carte->

des-heures-de-froid-du-maroc, zuletzt aktualisiert am 06.05.2025, zuletzt geprüft am 06.05.2025.

intersolar (2024): Photovoltaik-Recycling – bis zu 99 Prozent Rückgewinnung möglich. Online verfügbar unter <https://www.intersolar.de/neuigkeiten/recycling-von-photovoltaikmodulen>, zuletzt aktualisiert am 15.05.2025, zuletzt geprüft am 15.05.2025.

IRES (2024): Rapport de synthese: L’avenir de lagriculture au maroc dans un contexte de la rarete structurelle de L’eau. Institut Royal des Etudes Stratégiques. Online verfügbar unter https://www.ires.ma/sites/default/files/docs_publications/rapport-de-synthese_-avenir-de-lagriculture-au-maroc_-_version-publi-que.pdf, zuletzt geprüft am 10.12.2024.

Jäger, Mareike; Boos, Jürg; Abegg, Andreas; Junghardt, Johann; Rohrer, Jürg; Schibli, Beatrix; Strebel, Sven (2022): Machbarkeitsstudie Agro-Photovoltaik in der Schweizer Landwirtschaft | ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften. Online verfügbar unter <https://www.zhaw.ch/de/forschung/projekt/72548>, zuletzt aktualisiert am 08.04.2025, zuletzt geprüft am 21.04.2025.

Jain, Pulkit; Raina, Gautam; Sinha, Sunanda; Malik, Prashant; Mathur, Siddharth (2021): Agrovoltatics: Step towards sustainable energy-food combination. In: *Bio-resource Technology Reports* 15, S. 100766. DOI: 10.1016/j.biteb.2021.100766.

Jamil, Uzair; Hickey, Thomas; Pearce, Joshua M. (2024): Solar energy modelling and proposed crops for different types of agrivoltaics systems. In: *Energy* 304, S. 132074. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132074.

Jamroen, Chaowanan; Fongkerd, Chanon; Krongpha, Wipa; Komkum, Preecha; Pirayawaraporn, Alongkorn; Chindakham, Nachaya (2021): A novel UV sensor-based dual-axis solar tracking system: Implementation and performance analysis. In: *Applied Energy* 299, S. 117295. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117295.

Jensen, Adam R.; Sifnaios, Ioannis; Furbo, Simon; Dragsted, Janne (2022): Self-shading of two-axis tracking solar collectors: Impact of field layout, latitude, and aperture shape. In: *Solar Energy* 236, S. 215–224. DOI: 10.1016/j.soler.2022.02.023.

Jo, Hyun; Song, Jong Tae; Cho, Hyeonjun; Lee, Sangyeab; Choi, Seungmin; Jung, Ho-Jun et al. (2024): Evaluation of Yield and Yield Components of Rice in Vertical Agro-Photovoltaic System in South Korea. In: *Agriculture* 14 (6), S. 920. DOI: 10.3390/agriculture14060920.

Juillion, Perrine; Lopez, Gerardo; Fumey, Damien; Lesniak, Vincent; Génard, Michel; Vercambre, Gilles (2022): Shading apple trees with an agrivoltaic system: Impact on water relations, leaf morphophysiological characteristics and yield

determinants. In: *Scientia Horticulturae* 306, S. 111434. DOI: 10.1016/j.scienta.2022.111434.

Kaewnukultorn, Thunchanok; Sepúlveda-Mora, Sergio B.; Hegedus, Steven (2024): The impacts of DC/AC ratio, battery dispatch, and degradation on financial evaluation of bifacial PV+BESS systems. In: *Renewable Energy* 236, S. 121402. DOI: 10.1016/j.renene.2024.121402.

Kaltenbrunner, Martin; White, Matthew S.; Głowacki, Eric D.; Sekitani, Tsuyoshi; Someya, Takao; Sariciftci, Niyazi Serdar; Bauer, Siegfried (2012): Ultrathin and lightweight organic solar cells with high flexibility. In: *Nature Communications* 3 (1), S. 770. DOI: 10.1038/ncomms1772.

Kara, Mohammed; Assouguem, Amine; Rachid, Lahlali; Ercisli, Sezai; Haoudi, Nouha; Benmessaoud, Safaâ et al. (2025): A review on apple cultivation in Morocco: Current situation and future prospects. In: *Open Agriculture* 10 (1), Artikel 20250412. DOI: 10.1515/opag-2025-0412.

Kim, Sojung; Kim, Sumin; Yoon, Chang-Yong (2021): An Efficient Structure of an Agrophotovoltaic System in a Temperate Climate Region. In: *Agronomy* 11 (8), S. 1584. DOI: 10.3390/agronomy11081584.

Kolur, Shruti Mallikarjun; Burud, Anand; Ramasamy, M.; Sampath, V.; Chellem, Sushma Raj; Satapathy, Satya Narayan; Rout, Ankita (2024): A Review on Biotech Innovations in Seed Technology for Robust Crop Production. In: *Journal of Advances in Biology & Biotechnology* 27 (5), S. 535–550. DOI: 10.9734/jabb/2024/v27i5816.

Kousksou, Tarik; Allouhi, Amine; Belattar, M'barek; Jamil, Abdelmajid; El Rhafiki, Tarik; Zeraouli, Youssef (2015a): Morocco's strategy for energy security and low-carbon growth. In: *Energy* 84, S. 98–105. DOI: 10.1016/j.energy.2015.02.048.

Kousksou, Tarik; Allouhi, Amine; Belattar, M'barek; Jamil, Abdelmajid; El Rhafiki, Tarik; Zeraouli, Youssef (2015b): Renewable energy potential and national policy directions for sustainable development in Morocco. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47, S. 46–57. DOI: 10.1016/j.rser.2015.02.056.

Krinner Carport GmbH (2022): HyperFarm. Online verfügbar unter <https://www.krinner-solar.com/hyperfarm>, zuletzt aktualisiert am 21.05.2025, zuletzt geprüft am 21.05.2025.

Laaroussi, Amale; Laaroussi, Ouiame; Bouayad, Abdelrhani (2023): Environmental impact study of the NOOR 1 solar project on the Southern Region of Morocco. In: *Renew. Energy Environ. Sustain.* 8, S. 9. DOI: 10.1051/rees/2023007.

Lahlou, Ouiam (2016): Morocco - Global yield gap atlas. Online verfügbar unter <https://www.yieldgap.org/morocco>, zuletzt aktualisiert am 12.12.2024, zuletzt geprüft am 12.12.2024.

Lee, Sangik; Lee, Jong-hyuk; Jeong, Youngjoon; Kim, Dongsu; Seo, Byung-hun; Seo, Ye-jin et al. (2023): Agrivoltaic system designing for sustainability and smart farming: Agronomic aspects and design criteria with safety assessment. In: *Applied Energy* 341, S. 121130. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121130.

Leidreiter, Anna; Boselli, Filippo. (2015): 100% Renewable Energy: boosting Development in Morocco. World Future Council. Online verfügbar unter https://www.worldfuturecouncil.org/wp-content/uploads/2016/01/WFC_2015_100_Renewable_Energy_boosting_Development_in_Morocco.pdf, zuletzt geprüft am 07.05.2025.

Leitner, Hubert; Czaloun, Günther (2018): Innovatives Seil-tragsystem für anwendungen in der Agro-photovoltaik. Online verfügbar unter https://www.tu-graz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2018/files/lf/Session_C6/461_LF_Leitner.pdf, zuletzt geprüft am 20.04.2025.

Lempp, Philippe; Zeppenfeld, Lea (2018): Maroc : Énergie durable dans les provinces de Midelt et Tata (EDMITA). Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Online verfügbar unter https://www.gfa-group.de/projects/629730/EDMITA_fiche_projet.pdf, zuletzt geprüft am 06.05.2025.

Li, Xiaoyue; Li, Peicheng; Wu, Zhongbin; Luo, Deying; Yu, Hong-Yu; Lu, Zheng-Hong (2021): Review and perspective of materials for flexible solar cells. In: *Materials Reports: Energy* 1 (1), S. 100001. DOI: 10.1016/j.matre.2020.09.001.

Lin, Qingfeng; Lu, Linfeng; Tavakoli, Mohammad Mahdi; Zhang, Chi; Lui, Ga Ching; Chen, Zhuo et al. (2016): High performance thin film solar cells on plastic substrates with nanostructure-enhanced flexibility. In: *Nano Energy* 22, S. 539–547. DOI: 10.1016/j.nanoen.2016.02.042.

Liu, Wen; Liu, Luqing; Guan, Chenggang; Zhang, Fangxin; Li, Ming; Lv, Hui et al. (2018): A novel agricultural photovoltaic system based on solar spectrum separation. In: *Solar Energy* 162, S. 84–94. DOI: 10.1016/j.solener.2017.12.053.

Loudyi, Dalila; Hasnaoui, Moulay Driss; Fekri, Ahmed (2022): Flood Risk Management Practices in Morocco: Facts and Challenges. In: *Wadi Flash Floods*, S. 35–94. DOI: 10.1007/978-981-16-2904-4_2.

Lu, Lin; Law, Kin Man (2013): Overall energy performance of semi-transparent single-glazed photovoltaic (PV) window for a typical office in Hong Kong. In: *Renewable Energy* 49, S. 250–254. DOI: 10.1016/j.renene.2012.01.021.

Lu, Wen; Ajay, Pulavazhi (2024): Solar PV tracking system using arithmetic optimization with dual axis and sensor. In: *Measurement: Sensors* 33, S. 101089. DOI: 10.1016/j.measen.2024.101089.

Ludzuweit, Anja; Paterson, James S.; Wydra, Kerstin; Pump, Carl; Müller, Klaus; Miller, Yves (2025): Enhancing ecosystem services and biodiversity in agrivoltaics

through habitat-enhancing strategies. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 212, S. 115380. DOI: 10.1016/j.rser.2025.115380.

Lumby, Ben; Miller, Alasdair; Herriot, John (2012): Utility scale solar power plants : a guide for developers and investors. World Bank Group. Online verfügbar unter <https://documents.worldbank.org/pt/publication/documents-reports/documentdetail/868031468161086726/utility-scale-solar-power-plants-a-guide-for-developers-and-investors>, zuletzt aktualisiert am 08.05.2025, zuletzt geprüft am 08.05.2025.

Maalouf, Amani; Okoroafor, Tobechei; Jehl, Zacharie; Babu, Vivek; Resalati, Shahaboddin (2023): A comprehensive review on life cycle assessment of commercial and emerging thin-film solar cell systems. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 186, S. 113652. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113652.

Maazouz, Sophia (2016): Les contraintes à la culture du pommier au Maroc. In: *AGRIMAROC*, 15.11.2016. Online verfügbar unter <https://www.agrimaroc.ma/les-contraintes-a-la-culture-du-pommier-au-maroc/>, zuletzt geprüft am 13.12.2024.

MacDonald, James; Probst, Lorenz; Cladera, Josep Roca (2022): Opportunities and challenges for scaling agrivoltaics in rural and Urban Africa. In: *AIP Conference Proceedings* 2635 (1), S. 70002. DOI: 10.1063/5.0105526.

Macknick, Jordan; Hartmann, Heidi; Barron-Gafford, Greg; Beatty, Brenda; Burton, Robin; Seok-Choi, Chong et al. (2022): The 5 Cs of Agrivoltaic Success Factors in the United States: Lessons from the InSPIRE Research Study (National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), NREL/TP-6A20-83566). Online verfügbar unter <https://www.osti.gov/biblio/1882930>.

Magadley, Esther; Kabha, Ragheb; Dakka, Mohamad; Teitel, Meir; Friman-Peretz, Maayan; Kacira, Murat et al. (2022): Organic photovoltaic modules integrated inside and outside a polytunnel roof. In: *Renewable Energy* 182, S. 163–171. DOI: 10.1016/j.renene.2021.10.012.

Magarelli, Andrea; Mazzeo, Andrea; Ferrara, Giuseppe (2025): Exploring the Grape Agrivoltaic System: Climate Modulation and Vine Benefits in the Puglia Region, Southeastern Italy. In: *Horticulturae* 11 (2), S. 160. DOI: 10.3390/horticulturae11020160.

Maher, Hassnae; Moussadek, Rachid; Zouahri, Abdelmjid; Douaik, Ahmed; Dakak, Houria; El Moudane, Mouloud; Ghanimi, Ahmed (2020): Effect of no tillage on the physico-chemical properties of soils of the El Koudia region, Rabat (Morocco). In: *E3S Web of Conferences* 150, S. 3010. DOI: 10.1051/e3sconf/202015003010.

Majumdar, Debaleena; Pasqualetti, Martin J. (2018): Dual use of agricultural land: Introducing ‘agrivoltaics’ in Phoenix Metropolitan Statistical Area, USA. In: *Landscape & Urban Planning* 170, S. 150–168. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.10.011.

Malinkovich, Yakov; Sitbon, Moshe; Lineykin, Simon; Dagan, Kfir Jack; Baimel, Dmitry (2024): A Combined Persistence and Physical Approach for Ultra-Short-

Term Photovoltaic Power Forecasting Using Distributed Sensors. In: *Sensors* 24 (9), S. 2866. DOI: 10.3390/s24092866.

Mansouri, Ismail; Dakki, Mohamed; Issous, said; rochdi, Mouad; elhassani, Abdrahim; Squalli, Wafae et al. (2018): The First Survey Of European Serinchick's Growth Under Natural Conditions: Which Organs Get Maturity Before Nest Leaving? In: *Research Journal of Pharmaceutical Biological and Chemical Sciences* 9 (5), S. 64–73. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/348339579_The_First_Survey_Of_European_Serinchick's_Growth_Under_Natural_Conditions_Which_Organs_Get_Maturity_Before_Nest_Leaving.

MAP Express (2024): Dans le cadre de l'impulsion donnée par SM le Roi à la cause nationale, la carte officielle du Royaume du Maroc intégrant son Sahara publiée sur le site officiel du Quai d'Orsay. Maghreb Arabe Presse - Express. Online verfügbar unter <https://www.mapexpress.ma/actualite/monde/mpulsion-donnee-sm-roi-cause-nationale-carte-officielle-du-royaume-du-maroc-integrant-sahara-publiee-site-officiel-du-quai-dorsay/>, zuletzt aktualisiert am 12.05.2025, zuletzt geprüft am 12.05.2025.

MAPMDREF (2019): Agricultures en chiffres 2018. Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts. Online verfügbar unter https://www.agriculture.gov.ma/sites/default/files/19-00145-book_agricultures_en_chiffres_def.pdf, zuletzt geprüft am 17.01.2025.

MAPMDREF (2021a): Filière Arboricole. Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts. Online verfügbar unter <https://www.agriculture.gov.ma/fr/filiere/arboriculture>, zuletzt aktualisiert am 12.02.2025, zuletzt geprüft am 12.02.2025.

MAPMDREF (2021b): Génération Green 2020-2030. Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts. Online verfügbar unter <https://www.agriculture.gov.ma/index.php/en/node/57>, zuletzt geprüft am 05.02.2025.

Marchane, Ahmed; Boudhar, Abdelghani; Baba, Mohammed Wassim; Hanich, Lahoucine; Chehbouni, Abdelghani (2021): Snow Lapse Rate Changes in the Atlas Mountain in Morocco Based on MODIS Time Series during the Period 2000–2016. In: *Remote Sensing* 13 (17), S. 3370. DOI: 10.3390/rs13173370.

Marrou, H.; Wery, J.; Dufour, L.; Dupraz, C. (2013): Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. In: *European Journal of Agronomy* 44, S. 54–66. DOI: 10.1016/j.eja.2012.08.003.

Marrou, Hélène (2019): Agrivoltaics : a win-win system to combine food and energy production? Online verfügbar unter <https://communities.springernature.com/posts/agrivoltaics-a-win-win-system-to-combine-food-and-energy-production>, zuletzt aktualisiert am 26.02.2024, zuletzt geprüft am 20.04.2025.

Masen (2017a): Étude d'Impact Environnemental et Social du Complexe solaire de Noor Midelt. Moroccan Agency for Sustainable Energy. Online verfügbar unter https://www.masen.ma/sites/default/files/documents_rapport/1_6.pdf, zuletzt geprüft am 09.05.2025.

Masen (2017b): Noor IV Ouarzazate 70 MW Photovoltaic Power Project Kingdom of Morocco. Moroccan Agency for Sustainable Energy. Online verfügbar unter https://www.masen.ma/sites/default/files/documents_rapport/2_4.pdf, zuletzt geprüft am 12.05.2025.

Masen (2024): Renewable energy projects map. Moroccan Agency for Sustainable Energy. Online verfügbar unter <https://www.masen.ma/en/projects>, zuletzt aktualisiert am 06.05.2025, zuletzt geprüft am 06.05.2025.

Mazloomian, Katrina; Dore, Thomas R.; Buckwell, Mark; Bird, Liam; Shearing, Paul R.; Miller, Thomas S. (2025): Supercapacitor safety: Temperature driven instability and failure of electrochemical double layer capacitors. In: *Energy Storage Materials* 76, S. 104115. DOI: 10.1016/j.ensm.2025.104115.

Mazzeo, Domenico; Di Zio, Andrea; Pesenti, Claudio; Leva, Sonia (2025): Optimizing agrivoltaic systems: A comprehensive analysis of design, crop productivity and energy performance in open-field configurations. In: *Applied Energy* 390, S. 125750. DOI: 10.1016/j.apenergy.2025.125750.

MEE (2022): Chiffres Cles. Ministère de l'équipement et de l'eau. Online verfügbar unter <https://www.equipement.gov.ma/eau/Pages/Chiffres-Cles.aspx>, zuletzt aktualisiert am 20.01.2025, zuletzt geprüft am 20.01.2025.

MEF (2019): Le secteur agricole marocain: Tendances structurelles, enjeux et perspectives de développement. Unter Mitarbeit von Aziz LOUALI. Ministère de l'économie et des finances. Online verfügbar unter <https://www.finances.gov.ma/Publication/depf/2019/Le%20secteur%20agricole%20marocain.pdf>, zuletzt geprüft am 13.03.2025.

Meliho, Modeste; Khattabi, Abdellatif; Braun, Marco; Orlando, Collins A. (2023): Future climate change projections in the agroecological, bioclimatic, biogeographical and altitudinal vegetation zones of Morocco. In: *Afr J Ecol* 61 (4), S. 794–814. DOI: 10.1111/aje.13181.

MEM (2020): Programme Eolien Intégré 850 MW. Ministère de l'énergie et des mines. Online verfügbar unter <https://www.mem.gov.ma/Pages/actualite.aspx?act=221>, zuletzt aktualisiert am 03.12.2024, zuletzt geprüft am 03.12.2024.

MEM (2021a): Contributions Déterminées au Niveau National (CDN) actualisée. Ministère de l'énergie et des mines. Online verfügbar unter https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Moroccan%20updated%20NDC%202021%20_Fr.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2024.

MEM (2021b): La Valorisation Énergétique de la Biomasse à l'horizon 2030. Ministère de l'énergie et des mines. Online verfügbar unter <https://www.mem.gov.ma/Pages/actualite.aspx?act=279>, zuletzt aktualisiert am 03.12.2024, zuletzt geprüft am 03.12.2024.

MEM (2024a): Energy dependency rate. Ministère de l'énergie et des mines. Online verfügbar unter <https://www.mem.gov.ma/en/pages/index.aspx>, zuletzt aktualisiert am 06.05.2025, zuletzt geprüft am 06.05.2025.

MEM (2024b): Stratégie énergies renouvelables au Maroc. Ministère de l'énergie et des mines. Online verfügbar unter <https://www.mem.gov.ma/Pages/secteur.aspx?e=2>, zuletzt aktualisiert am 09.09.2024, zuletzt geprüft am 09.09.2024.

Moinina, Alieu; Lahlali, Rachid; Boulif, Mohammed (2019): Important pests, diseases and weather conditions affecting apple production in Morocco: Current state and perspectives. In: *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires* 7 (1). Online verfügbar unter https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_I-AVH2/article/view/669.

Molle, François; Tanouti, Oumaima (2017): Squaring the circle: Agricultural intensification vs. water conservation in Morocco. In: *Agricultural Water Management* 192, S. 170–179. DOI: 10.1016/j.agwat.2017.07.009.

Moretti, Simona; Marucci, Alvaro (2019): A Photovoltaic Greenhouse with Variable Shading for the Optimization of Agricultural and Energy Production. In: *Energies* 12 (13), S. 2589. DOI: 10.3390/en12132589.

Moser, Massimo; Trieb, Franz; Fichter, Tobias (2013): Potential of Concentrating Solar Power Plants for the Combined Production of Water and Electricity in MENA Countries. In: *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 1 (2), S. 122–140. DOI: 10.13044/j.sdewes.2013.01.0009.

Mouhib, Elmehti; Fernández-Solas, Álvaro; Pérez-Higueras, Pedro J.; Fernández-Ocaña, Ana M.; Micheli, Leonardo; Almonacid, Florencia; Fernández, Eduardo F. (2024): Enhancing land use: Integrating bifacial PV and olive trees in agrivoltaic systems. In: *Applied Energy* 359, S. 122660. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.122660.

Msanda, Fouad; El Aboudi, Ahmed; Peltier, Jean-Paul (2002): Originalité de la flore et de la végétation de l'Anti-Atlas sud-occidental (Maroc). In: *Feddes Repertorium* 113 (7-8), S. 603–615. DOI: 10.1002/fedr.200290008.

MTEDD (2020): Quatrième Communication Nationale du Maroc à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. Ministère de la Transition énergétique et du Développement durable. Online verfügbar unter https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Quatri%C3%A8me%20Communication%20Nationale_MOR.pdf, zuletzt geprüft am 07.12.2024.

Murray, Donal B.; Hayes, John G. (2015): Cycle Testing of Supercapacitors for Long-Life Robust Applications. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* 30 (5), S. 2505–2516. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2373368.

Musa, Abdulwaheed; Alozie, Emmanuel; Suleiman, Suleiman A.; Ojo, John Adedapo; Imoize, Agbotiname Lucky (2023): A Review of Time-Based Solar Photovoltaic Tracking Systems. In: *Information* 14 (4), S. 211. DOI: 10.3390/info14040211.

MyHammer (2024): Dachrinne montieren: was kostet es? - MyHammer. Online verfügbar unter <https://www.my-hammer.de/dacharbeiten/preisradar/was-kostet-dachrinne-montieren>, zuletzt aktualisiert am 09.05.2025, zuletzt geprüft am 09.05.2025.

Naim, Firdaus (2025): Morocco's Wind Energy Capacity Reached 2,373 MW by End of 2024. Online verfügbar unter <https://www.moroccoworld-news.com/2025/02/164986/moroccos-wind-energy-capacity-reached-2-373-mw-by-end-of-2024/>, zuletzt aktualisiert am 11.02.2025, zuletzt geprüft am 11.05.2025.

Naimi, Youssef; Saghir, Mohammed; Cherqaoui, Abdelouahed; Chatre, B. (2017): Energetic recovery of biomass in the region of Rabat, Morocco. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (2), S. 1396–1402. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.055.

Nakach, Issam; Mouhat, Ouadia; Shamass, Rabee; el Mennaoui, Fatima (2023): Review of strategies for sustainable energy in Morocco. In: *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* 26 (2), S. 65–104. DOI: 10.33223/epj/163373.

Nelson, Joel A. (2010): Effects of Cloud-Induced Photovoltaic Power Transients on Power System Protection. In: *Master's Theses*. DOI: 10.15368/theses.2010.193.

Next2Sun GmbH (2021): Innovative Photovoltaik von Next2Sun Agri-Photovoltaik für eine Doppelnutzung der Fläche. Online verfügbar unter https://www.msn-pv.de/wp-content/uploads/2021/04/2021-03-Next-Sun_Agri-PV.pdf.

Nkinyam, Charity M.; Ujah, Chika Oliver; Nnakwo, Kingsley C.; Kallon, Daramy V.V. (2025): Insight into organic photovoltaic cell: Prospect and challenges. In: *Unconventional Resources* 5, S. 100121. DOI: 10.1016/j.unres.2024.100121.

Noman, Muhammad; Khan, Zeeshan; Jan, Shayan Tariq (2024): A comprehensive review on the advancements and challenges in perovskite solar cell technology. In: *RSC Advances* 14 (8), S. 5085–5131. DOI: 10.1039/D3RA07518D.

Obulesu, Dakka (2025): Supercapacitor-battery hybrid storage systems to grid-tied photovoltaic setups to improve energy management and system stability. In: *Journal of Information Systems Engineering and Management* 10 (38s), S. 780–788. DOI: 10.52783/jisem.v10i38s.6966.

Okonye, Leonard U.; Ren, Jianwei (2024): A comprehensive review of PETW recycling for supercapacitor applications. In: *Heliyon* 10 (15), e35285. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e35285.

ONEE (2024a): Energie Electrique Chiffres Cles 2023. Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable. Online verfügbar unter http://www.one.org.ma/fr/pdf/Depliant_Francais_2023.pdf, zuletzt geprüft am 30.01.2025.

ONEE (2024b): L'ONEE procède à la mise en service du parc éolien de Jbel Lahdid de 270 MW. Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable. Online verfügbar unter <http://www.one.org.ma/fr/pages/actualia.asp?esp=2&id1=8&id2=70&t2=1&id=3570>, zuletzt aktualisiert am 02.02.2025, zuletzt geprüft am 02.02.2025.

ONEE (2024c): STEP Abdelmoumen (350 MW). Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable. Online verfügbar unter <http://www.one.org.ma/fr/pages/interne.asp?esp=2&id1=5&id2=54&id3=46&t2=1&t3=1#>, zuletzt aktualisiert am 03.02.2025, zuletzt geprüft am 03.02.2025.

Ouassanouan, Youness; Fakir, Younes; Simonneaux, Vincent; Kharrou, Mohamed Hakim; Bouimouass, Houssne; Najjar, Insaf et al. (2022): Multi-decadal analysis of water resources and agricultural change in a Mediterranean semiarid irrigated piedmont under water scarcity and human interaction. In: *The Science of the total environment*. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155328.

Ouraich, Ismail (2014): Agriculture, climate change, and adaptation in Morocco: A computable general equilibrium analysis. In: *Open Access Dissertations*. Online verfügbar unter https://docs.lib.purdue.edu/open_access_dissertations/529.

Park, Giwoong; Kim, Donghyun (2025): Spatial analysis of Urban land use impact on new solar photovoltaic capacity: A case study of South Korea. In: *Energy Policy* 199, S. 114545. DOI: 10.1016/j.enpol.2025.114545.

Parker, Michael; Unrath, C. Richard; Safley, Charles; Lockwood, David (1998): High Density Apple Orchard Management. NC State Extension. Online verfügbar unter <https://content.ces.ncsu.edu/high-density-apple-orchard-management>, zuletzt aktualisiert am 07.05.2025, zuletzt geprüft am 07.05.2025.

Pascaris, Alexis S.; Schelly, Chelsea; Burnham, Laurie; Pearce, Joshua M. (2021): Integrating solar energy with agriculture: Industry perspectives on the market, community, and socio-political dimensions of agrivoltaics. In: *Energy Research & Social Science* 75, S. 102023. DOI: 10.1016/j.erss.2021.102023.

Patel, M. Tahir; Khan, M. Ryyan; Sun, Xingshu; Alam, Muhammad A. (2019): A worldwide cost-based design and optimization of tilted bifacial solar farms. In: *Applied Energy* 247, S. 467–479. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.03.150.

Pawel, Ilja (2014): The Cost of Storage – How to Calculate the Levelized Cost of Stored Energy (LCOE) and Applications to Renewable Energy Generation. In: *Energy Procedia* 46, S. 68–77. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.01.159.

Photons Energy Ltd. (2021): EU-APV-Kosten APV Anlage.

Pierri, Erika; Hellkamp, Dana; Thiede, Sebastian; Herrmann, Christoph (2021): Enhancing Energy Flexibility through the Integration of Variable Renewable Energy in the Process Industry. In: *Procedia CIRP* 98, S. 7–12. DOI: 10.1016/j.procir.2020.12.001.

Power Technology (2020): Noor Ouarzazate Solar Complex. Online verfügbar unter <https://www.power-technology.com/projects/noor-ouarzazate-solar-complex/?cf-view>, zuletzt aktualisiert am 29.06.2020, zuletzt geprüft am 12.05.2025.

Rahou, El hassania; Taqi, Ahmed (2021): Informal micro-enterprises: What impact does the business environment have on the decision of formalization? In: *E3S Web of Conferences* 234, S. 52. DOI: 10.1051/e3sconf/202123400052.

Raiffeisenzeitung (2022): Agri-PV-Experiment in Haidegg bei Graz - Raiffeisenzeitung. Online verfügbar unter <https://raiffeisenzeitung.at/agri-pv-haidegg/>, zuletzt aktualisiert am 03.07.2023, zuletzt geprüft am 11.05.2025.

Randle-Boggis, Richard J.; Lara, Eileen; Onyango, Joel; Temu, Emmanuel J.; Hartley, Sue E. (2021): Agrivoltaics in East Africa: Opportunities and challenges. In: *AIP Conference Proceedings* 2361 (1), S. 90001. DOI: 10.1063/5.0055470.

Rankel, Kiersten (2024): Golden Delicious Apple: How to Plant. Online verfügbar unter https://greg.app/how-to-plant-golden-delicious-apple/?utm_source=chatgpt.com, zuletzt aktualisiert am 07.05.2025, zuletzt geprüft am 07.05.2025.

Rankel, Kiersten (2025): All About Starkrimson Apple: Essential Facts. Online verfügbar unter <https://greg.app/starkrimson-apple-overview/>, zuletzt aktualisiert am 07.05.2025, zuletzt geprüft am 07.05.2025.

Raut, Hemant Kumar; Ganesh, V. Anand; Nair, A. Sreekumaran; Ramakrishna, Seeram (2011): Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review. In: *Energy & Environmental Science* 4 (10), S. 3779. DOI: 10.1039/C1EE01297E.

Rech, Sergio; Lazzaretto, Andrea; Grigolon, Enrico (2018): Optimum integration of concentrating solar technologies in a real coal-fired power plant for fuel saving. In: *Energy Conversion and Management* 178, S. 299–310. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.10.026.

RES4Africa (2023a): Agrivoltaics: Harvesting solar energy in the Mediterranean. In: *RES4Africa Foundation (Renewable Energy Solutions for Africa)*. Online verfügbar unter <https://res4africa.org/wp-content/uploads/2023/06/Agrivoltaics-harvesting-solar-energy-in-the-Med-Online-Verison-1.pdf>, zuletzt geprüft am 09.09.2024.

RES4Africa (2023b): Powering desalination with renewable energies in Morocco. In: *RES4Africa Foundation (Renewable Energy Solutions for Africa)*. Online verfügbar unter https://res4africa.org/wp-content/uploads/2023/06/desalination_morocco_FINAL_DIGITAL.pdf, zuletzt geprüft am 09.09.2024.

RES4Africa (2024): RES4Africa Successfully Concludes Key Event in Morocco, Paving the Way for a Future-Proof Energy System - Res4Africa. Renewable Energy Solutions for Africa (RES4Africa Foundation). Online verfügbar unter <https://res4africa.org/news/2024/res4africa-successfully-concludes-key-event-in-morocco-paving-the-way-for-a-future-proof-energy-system/>, zuletzt aktualisiert am 18.10.2024, zuletzt geprüft am 02.12.2024.

Rimi, Abdelkrim; Zarhloule, Yassine; Barkaoui, Alae Eddine; Correia, Antonio; Carneiro, Julio; Verdoya, Massimo; Lucazeau, Francis (2012): Towards a de-carbonized energy system in north-eastern Morocco: Prospective geothermal resource. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (4), S. 2207–2216. DOI: 10.1016/j.rser.2011.12.008.

Rock, Brian A. (2020): comparing building surfaces' orientations to optimize solar energy collection. In: *Journal of Green Building* 15 (2), S. 3–28. DOI: 10.3992/1943-4618.15.2.3.

Rösch, Christine; Fakharizadehshirazi, Elham (2024): The spatial socio-technical potential of agrivoltaics in Germany. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 202, S. 114706. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114706.

Rößner, Johanna-Viktoria (2022): Rainwater Management in Agrivoltaic Systems - Research and Development Potential. In: World Conference on Photovoltaic Energy Conversion 2022. Online verfügbar unter <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/3b5b8f3d-3bb9-4772-b89f-2749ce31c8fb>.

Rühmer, Thomas; Steinbauer, Leonhard (2023): 2023-03 AGRI PV NEWS - Blattschorf und andere Pilzkrankheiten unter der AGRI-PV. Online verfügbar unter https://www.agrar.steiermark.at/cms/dokumente/12945362_13888112/0d79929b/2023-03%20AGRI%20PV%20NEWS%20-%20Blattschorf%20und%20andere%20Pilzkrankheiten%20unter%20der%20AGRI-PV.pdf, zuletzt geprüft am 07.05.2025.

Ryser, Sarah (2019): The Anti-Politics Machine of Green Energy Development: The Moroccan Solar Project in Ouarzazate and Its Impact on Gendered Local Communities. In: *Land* 8 (6), S. 100. DOI: 10.3390/land8060100.

Saravanapavanantham, Mayuran; Mwaura, Jeremiah; Bulović, Vladimir (2023): Printed Organic Photovoltaic Modules on Transferable Ultra-thin Substrates as Additive Power Sources. In: *Small Methods* 7 (1), e2200940. DOI: 10.1002/smtd.202200940.

Sarkın, Ali Samet; Ekren, Nazmi; Sağlam, Şafak (2020): A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels. In: *Solar Energy* 199, S. 63–73. DOI: 10.1016/j.solener.2020.01.084.

Sarr, Aminata; Soro, Y. Moussa; Tossa, Alain K.; Diop, Lamine (2023): Agrivoltaic, a Synergistic Co-Location of Agricultural and Energy Production in Perpetual Mutation: A Comprehensive Review. In: *Processes* 11 (3), S. 948. DOI: 10.3390/pr11030948.

Satour, Narjiss; Raji, Othmane; El Moçayd, Nabil; Kacimi, Ilias; Kassou, Nadia (2021): Spatialized flood resilience measurement in rapidly urbanized coastal areas with a complex semi-arid environment in northern Morocco. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 21 (3), S. 1101–1118. DOI: 10.5194/nhess-21-1101-2021.

Schindele, Stephan; Trommsdorff, Maximilian; Schlaak, Albert; Obergfell, Tabea; Bopp, Georg; Reise, Christian et al. (2020): Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. In: *Applied Energy* 265, S. 114737. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114737.

Semeraro, Teodoro; Scarano, Aurelia; Santino, Angelo; Emmanuel, Rohinton; Lenucci, Marcello (2022): An innovative approach to combine solar photovoltaic gardens with agricultural production and ecosystem services. In: *Ecosystem Services* 56, S. 101450. DOI: 10.1016/j.ecoser.2022.101450.

Sepúlveda-Oviedo, Edgar Hernando (2025): Impact of environmental factors on photovoltaic system performance degradation. In: *Energy Strategy Reviews* 59, S. 101682. DOI: 10.1016/j.esr.2025.101682.

Sierra, Joan Pau; Martín, César; Mössö, César; Mestres, Marc; Jebbad, Raghda (2016): Wave energy potential along the Atlantic coast of Morocco. In: *Renewable Energy* 96, S. 20–32. DOI: 10.1016/j.renene.2016.04.071.

Skees, Jerry R.; Gober, Stephanie; Varangis, Panos; Lester, Rodney R.; Kalavakonda, Vijay (2001): Developing Rainfall-Based Index Insurance in Morocco. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/23722465_Developing_Rainfall-Based_Index_Insurance_In_Morocco, zuletzt aktualisiert am 20.04.2016, zuletzt geprüft am 12.02.2025.

Snoussi, Maria; Niazi, Saïda; Khouakhi, Abdou; Raji, Othmane (2011): Climate change and sea-level rise: A GIS based vulnerability and impact assessment, the case of the Moroccan coast. In: *Geomatic Solutions for Coastal Environments*, S. 275–310. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/268688126_Climate_change_and_sea-level_rise_A_GIS_based_vulnerability_and_impact_assessment_the_case_of_the_Moroccan_coast.

Solargis (2025): Global Solar Atlas. Online verfügbar unter <https://globalsolaratlas.info/map?s=32.486131,-4.725691&m=site&c=32.184911,-9.063721,6>, zuletzt aktualisiert am 05.05.2025, zuletzt geprüft am 06.05.2025.

Solarserver (2024): Klimapark Steinhöfel: Größte Agri-PV-Anlage Europas entsteht in Brandenburg - Solarserver. Online verfügbar unter <https://www.solarserver.de/2024/08/28/klimapark-steinhoefel-groesste-agri-photovoltaik-anlage-europas-entsteht-in-brandenburg/>, zuletzt aktualisiert am 29.08.2024, zuletzt geprüft am 17.04.2025.

Soto-Gómez, Diego (2024): Integration of Crops, Livestock, and Solar Panels: A Review of Agrivoltaic Systems. In: *Agronomy* 14 (8), S. 1824. DOI: 10.3390/agronomy14081824.

SPIE (2024): SUNfarming und SPIE realisieren Umspannwerk für grünen Strom aus größtem Agri-Solar-Projekt in Europa. Société Parisienne pour l'Industrie Electrique (SPIE). Online verfügbar unter <https://spie.de/presse/2024/08/sunfarming-und-spie-realisieren-umspannwerk-f%C3%BCr-gr%C3%BCnen-strom-aus-gr%C3%B6%C3%9Ftem-agri-solar-projekt-in-europa>, zuletzt aktualisiert am 17.04.2025, zuletzt geprüft am 17.04.2025.

Spinnanker GmbH (2024): Prinzip Spinnanker - Spinnanker.com. Online verfügbar unter <https://spinnanker.com/systemtechnik/prinzip-spinnanker/>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2024, zuletzt geprüft am 21.04.2025.

Spinola, Luigi (2017): A CREATIVE LIGHT: OUARZAZATE STORIES. Online verfügbar unter <https://www.eib.org/en/essays/geopolitics-of-the-sun-spinola>, zuletzt aktualisiert am 12.05.2025, zuletzt geprüft am 12.05.2025.

Statista (2024a): Marokko - Anteile der Wirtschaftssektoren am Bruttoinlandsprodukt (BIP) | Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/953072/umfrage/anteile-der-wirtschaftssektoren-am-bruttoinlandsprodukt-bip-von-marokko/>, zuletzt aktualisiert am 10.12.2024, zuletzt geprüft am 10.12.2024.

Statista (2024): Infografik: Wer 2050 genug Wasser zur Verfügung hat – und wer nicht. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/infografik/31951/geschaetzter-anteil-menschlicher-wassernutzung-an-wasserverfuegbarkeit--wasserstress--im-jahr-2050/>, zuletzt aktualisiert am 24.02.2025, zuletzt geprüft am 24.02.2025.

Statista (2025a): Morocco: main agricultural products | Statista. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/1302570/agricultural-production-in-morocco-by-product/>, zuletzt aktualisiert am 12.02.2025, zuletzt geprüft am 12.02.2025.

Statista (2025b): Morocco: renewable energy capacity targets 2020-2050 | Statista. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/1360319/renewable->

capacity-target-as-share-of-energy-production-in-morocco/, zuletzt aktualisiert am 12.05.2025, zuletzt geprüft am 12.05.2025.

Statista (2025c): Morocco: share of exports by sector 2023 | Statista. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/1240253/share-of-exports-from-morocco-by-sector/>, zuletzt aktualisiert am 03.02.2025, zuletzt geprüft am 03.02.2025.

Statista (2025d): Surfaces agricole : répartition par type d'irrigation Maroc 2017 | Statista. Online verfügbar unter <https://fr.statista.com/statistiques/949126/parts-terre-agricole-maroc-type-irrigation/>, zuletzt aktualisiert am 29.01.2025, zuletzt geprüft am 29.01.2025.

Sun, Haowei; Wang, Yanhui; Wang, Li (2024): Impact of climate change on wheat production in China. In: *European Journal of Agronomy* 153, S. 127066. DOI: 10.1016/j.eja.2023.127066.

Tajima, Makoto; Iida, Tetsunari (2021): Evolution of agrivoltaic farms in Japan. In: *AGRIVOLTAICS2020 CONFERENCE: Launching Agrivoltaics World-wide* 2361 (1), S. 30002. DOI: 10.1063/5.0054674.

Tawalbeh, Muhammad; Al-Othman, Amani; Kafiah, Feras; Abdelsalam, Emad; Al-momani, Fares; Alkasrawi, Malek (2021): Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. In: *The Science of the total environment* 759, S. 143528. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143528.

Tekken, Vera; Kropp, Jürgen (2012): Climate-Driven or Human-Induced: Indicating Severe Water Scarcity in the Moulouya River Basin (Morocco). In: *Water* 4 (4), S. 959–982. DOI: 10.3390/w4040959.

The Wind Power (2024): Khalladi (Marokko) - Windparks - Online-Zugriff - The Wind Power. Online verfügbar unter https://www.thewindpower.net/wind-farm_en_25005_khalladi.php, zuletzt aktualisiert am 02.12.2024, zuletzt geprüft am 02.12.2024.

Thompson, Elinor P.; Bombelli, Emilio L.; Shubham, Simon; Watson, Hamish; Everard, Aldous; D'Ardes, Vincenzo et al. (2020): Tinted Semi-Transparent Solar Panels Allow Concurrent Production of Crops and Electricity on the Same Cropland. In: *Advanced Energy Materials* 10 (35), Artikel 2001189, S. 2001189. DOI: 10.1002/aenm.202001189.

Tiwari, Umesh (2024): Differences between supercapacitors and batteries. Malvern Panalytical. Online verfügbar unter <https://www.malvernpanalytical.com/en/learn/knowledge-center/insights/what-is-the-difference-between-supercapacitors-and-batteries>, zuletzt aktualisiert am 08.05.2025, zuletzt geprüft am 08.05.2025.

Toledo, Carlos; Scognamiglio, Alessandra (2021): Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns). In: *Sustainability* 13 (12), S. 6871. DOI: 10.3390/su13126871.

top agrar (2023): Studie: Agri-PV mit Trackern fördert Landwirtschaft und Biodiversität. Online verfügbar unter <https://www.topagrar.com/energie/news/studie-agri-pv-mit-trackern-foerdert-landwirtschaft-und-biodiversitaet-13363188.html>, zuletzt aktualisiert am 11.10.2024, zuletzt geprüft am 22.04.2025.

Toreti, Andrea; Tsegai, Daniel; Maurer, T.; Cremonese, Edoardo; Rossi, Lauro; Wens, Marthe et al. (2024): World Drought Atlas. In: 1018-5593. DOI: 10.2760/8057111.

Touil, Sami; Richa, Amina; Fizir, Meriem; Bingwa, Brendon (2021): Shading effect of photovoltaic panels on horticulture crops production: a mini review. In: *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 20 (2), S. 281–296. DOI: 10.1007/s11157-021-09572-2.

Treguer, David; Verner, Dorte; Redwood, John; Christensen, Jens; McDonnell, Rachael; Elbert, Christine et al. (2018): Climate Variability, Drought, and Drought Management in Morocco's Agricultural Sector: World Bank, Washington, DC. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/328750660_Climate_Variability_Drought_and_Drought_Management_in_Morocco's_Agricultural_Sector.

Trommsdorff, Max; Dhal, Ipsa Sweta; Özdemir, Özal Emre; Ketzer, Daniel; Weinberger, Nora; Rösch, Christine (2022): Chapter 5 - Agrivoltaics: solar power generation and food production. In: Shiva Gorjian und Pietro Elia Campana (Hg.): *Solar Energy Advancements in Agriculture and Food Production Systems*: Academic Press, S. 159–210. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323898669000122>.

Trommsdorff, Max; Gruber, Simon; Keinath, Tobias; Hopf, Michaela; Hermann, Charis; Schönberger, Frederik et al. (2024): Leitfaden Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/agri-photovoltaik-chance-fuer-landwirtschaft-und-energie-wende.html>, zuletzt aktualisiert am 16.04.2025, zuletzt geprüft am 16.04.2025.

Trommsdorff, Max; Kang, Jinsuk; Reise, Christian; Schindele, Stephan; Bopp, Georg; Ehmann, Andrea et al. (2021): Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140, S. 110694. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110694.

Tsai, Yu-Hsin; Lin, Tzu-Chin; Lin, Shih-Yuan; van Gasselt, Stephan; Chen, Chia-Lin; Hsu, Chia-Hsin et al. (2019): The Effects of Green Energy Production on Farmland: A Case Study in Yunlin County, Taiwan: IntechOpen. Online verfügbar unter <https://scispace.com/papers/the-effects-of-green-energy-production-on-farmland-a-case-1i67jfgw6f>.

UNFCCC (2023): Losses and Damages related to Floods in Morocco Submission by the AMCDD: Moroccan Alliance for Climate and Sustainable Development. United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC. Online verfügbar unter https://unfccc.int/sites/default/files/resource/TC3%20submission_AMCDD_Morocco.pdf, zuletzt geprüft am 13.12.2024.

Uselis, Nobertas; Viškelis, Jonas; Lanauskas, Juozas; Liaudanskas, Mindaugas; Janulis, Valdimaras; Kviklys, Darius (2020): Planting distance affects apple tree growth, fruit yield and quality. In: *Zemdirbyste-agriculture*. Online verfügbar unter <https://www.semanticscholar.org/paper/Planting-distance-affects-apple-tree-growth%2C-fruit-Uselis-Vi%C5%A1kelis/71d2d5b8869a1fe6b682d7e18dac2531c3790707>.

van Dijk, Michiel; Morley, Tom; Rau, Marie Luise; Saghai, Yashar (2021): A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010-2050. In: *Nature Food* 2 (7), S. 494–501. DOI: 10.1038/s43016-021-00322-9.

Visit Drâa Tafilalet (2023): Pomme de Midelt : Une fierté nationale. Online verfügbar unter <https://visitdraatafilalet.com/blog/pomme-de-midelt-une-fierte-nationale/>, zuletzt aktualisiert am 09.05.2023, zuletzt geprüft am 06.05.2025.

Wagner, Johanna; Bühner, Charlotte; Gölz, Sebastian; Trommsdorff, Max; Jürkenbeck, Kristin (2024): Factors influencing the willingness to use agrivoltaics: A quantitative study among German farmers. In: *Applied Energy* 361, S. 122934. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.122934.

Wang, Jiannan; Azam, Waseem (2024): Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. In: *Geoscience Frontiers* 15 (2), S. 101757. DOI: 10.1016/j.gsf.2023.101757.

Warmann, Emily; Jenerette, G. Darrel; Barron-Gafford, Greg A. (2024): Agrivoltaic system design tools for managing trade-offs between energy production, crop productivity and water consumption. In: *Environmental Research Letters* 19 (3), S. 34046. DOI: 10.1088/1748-9326/ad2ab8.

Waterloo, Maarten J.; Arshad, Rohma; La Loma González, Beatriz; Monente, Gloria Soler (2025): Rainwater harvesting potential from photovoltaic energy systems in the Sahel. In: *Water-Energy Nexus*. DOI: 10.1016/j.wen.2025.04.002.

Weltbank (2017a): Morocco: Noor Ouarzazate Concentrated Solar Power Complex. Weltbank. Online verfügbar unter <https://ppp.worldbank.org/public-private->

partnership/sites/ppp.worldbank.org/files/2022-02/MoroccoNoorQuarzazateSolar_WBG_AfDB_EIB.pdf, zuletzt geprüft am 29.01.2025.

Weltbank (2017b): Program-for-results information document (pid) appraisal stage strengthening agri-food value-chains. Report No.: PIDA0136169. Weltbank. Online verfügbar unter [https://ewsddata.rightsindevelopment.org/files/documents/46/WB-P158346.pdf#:~:text=other%20tree%20crops%20\(citrus%20experi-enced%20the%20highest,of%20high%2Dvalue%20crops%20\(olive%2C%20ci-trus%20and%20other](https://ewsddata.rightsindevelopment.org/files/documents/46/WB-P158346.pdf#:~:text=other%20tree%20crops%20(citrus%20experi-enced%20the%20highest,of%20high%2Dvalue%20crops%20(olive%2C%20ci-trus%20and%20other), zuletzt geprüft am 23.02.2025.

Weltbank (2020): Technical Potential for Offshore Wind in Morocco. Online verfügbar unter <https://documents1.worldbank.org/curated/en/175001572464012101/pdf/Technical-Potential-for-Offshore-Wind-in-Morocco-Map.pdf>, zuletzt geprüft am 02.12.2024.

Weltbank (2023): Morocco - Country Climate and Development Report (CCDR) : Background Paper - Water Scarcity and Droughts. World Bank Group. Online verfügbar unter <https://documents.banquemoniale.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099052223171017467/p177376069cb2d0150ab3f05610a6eea165>, zuletzt aktualisiert am 11.12.2024, zuletzt geprüft am 11.12.2024.

Weltbank (2024a): Maroc : un nouveau programme pour renforcer la résilience climatique de l'agriculture et améliorer la qualité de la production alimentaire. Online verfügbar unter <https://www.banquemoniale.org/fr/news/press-release/2024/12/19/new-program-will-boost-climate-resilience-of-agriculture-and-quality-of-food-production-in-morocco>, zuletzt aktualisiert am 05.04.2025, zuletzt geprüft am 05.04.2025.

Weltbank (2024b): Promoting Climate Resilient Irrigation in Morocco. In: *World Bank Group* 2024, 17.06.2024. Online verfügbar unter <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2024/06/17/promoting-climate-resilient-irrigation-in-morocco>, zuletzt geprüft am 12.12.2024.

Weselek, Axel; Bauerle, Andrea; Hartung, Jens; Zikeli, Sabine; Lewandowski, Iris; Högy, Petra (2021): Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. In: *Agronomy for Sustainable Development* 41 (5), S. 59. DOI: 10.1007/s13593-021-00714-y.

Weselek, Axel; Ehmann, Andrea; Zikeli, Sabine; Lewandowski, Iris; Schindele, Stephan; Högy, Petra (2019): Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. In: *Agronomy for Sustainable Development* 39 (4), S. 1–20. DOI: 10.1007/s13593-019-0581-3.

Widmer, Jocelyn; Christ, Bastien; Grenz, Jan; Norgrove, Lindsey (2024): Agrivoltaics, a promising new tool for electricity and food production: A systematic review.

In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 192, S. 114277. DOI: 10.1016/j.rser.2023.114277.

Williams, Henry J.; Wang, Yipu; Yuan, Bo; Wang, Haomiao; Zhang, K. Max (2025): Rethinking agrivoltaic incentive programs: A science-based approach to encourage practical design solutions. In: *Applied Energy* 377, S. 124272. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.124272.

Willockx, Brecht; Herteleer, Bert; Cappelle, Jan (2020a): Techno-economic study of agrovoltaic systems focusing on orchard crops. In: 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/344429017_Techno-economic_study_of_agrovoltaic_systems_focusing_on_orchard_crops.

Willockx, Brecht; Lavaert, Cas; Cappelle, Jan (2023): Performance evaluation of vertical bifacial and single-axis tracked agrivoltaic systems on arable land. In: *Renewable Energy* 217, S. 119181. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119181.

Willockx, Brecht; Uytterhaegen, Bert; Ronsijn, Bram; Herteleer, Bert; Cappelle, Jan (2020b): A standardized classification and performance indicators of agrivoltaic systems. In: 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/344476688_A_standardized_classification_and_performance_indicators_of_agrivoltaic_systems.

Wolf GmbH (o. J.): Betonlose Fundamente - Spinnanker, Bodenankersystem. Online verfügbar unter <https://www.wolfsystem.at/produktsparten/agrarbau/fundamente/betonlose-fundamente>, zuletzt aktualisiert am 21.04.2025, zuletzt geprüft am 21.04.2025.

Worldometer (o. J.): Morocco Map (Physical) - Worldometer. Online verfügbar unter <https://www.worldometers.info/maps/morocco-map/>, zuletzt aktualisiert am 06.05.2025, zuletzt geprüft am 06.05.2025.

Woyte, Achim; Richter, Mauricio; Moser, David; Reich, Nils; Green, Mike; Mau, Stefan (2014): Analytical monitoring of grid-connected photovoltaic systems. International Energy Agency (IEA PVPS T13-03: 2014). Online verfügbar unter https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_T13-D2_3_Analytical_Monitoring_of_PV_Systems_Final.pdf, zuletzt geprüft am 08.05.2025.

Wu, Zhiyong; Hou, Anping; Chang, Chun; Huang, Xiang; Shi, Duoqi; Wang, Zhi-feng (2014): Environmental impacts of large-scale CSP plants in northwestern China. In: *Environmental science. Processes & impacts* 16 (10), S. 2432–2441. DOI: 10.1039/c4em00235k.

Wurster, Thomas S.; Schubert, Markus B. (2014): Mismatch loss in photovoltaic systems. In: *Solar Energy* 105, S. 505–511. DOI: 10.1016/j.solener.2014.04.014.

Wydra, Kerstin; Vollmer, Vera; Busch, Christin; Prichta, Susann (2023): Agrivoltaic: Solar Radiation for Clean Energy and Sustainable Agriculture with Positive Impact on Nature. In: *Solar Radiation - Enabling Technologies, Recent Innovations, and Advancements for Energy Transition* [Working Title]: IntechOpen.

Wydra, Kerstin; Vollmer, Vera; Schmidt, Sabine; Prichta, Susann; Kunze, Rahel; Aulich, Hubert (2022): Potential der Agri-Photovoltaik in Thüringen.

Xiao, Yuanyuan; Zhang, Huiwen; Pan, Shuyi; Wang, Quan; He, Jijiang; Jia, Xiaoxia (2022): An agrivoltaic park enhancing ecological, economic and social benefits on degraded land in Jiangshan, China. In: *AIP Conference Proceedings* 2635 (1), S. 20002. DOI: 10.1063/5.0106454.

Yard, Stefan (2000): Developments of the payback method. In: *International Journal of Production Economics* 67 (2), S. 155–167. DOI: 10.1016/S0925-5273(00)00003-7.

Yun, Min Ju; Sim, Yeon Hyang; Lee, Dong Yoon; Cha, Seung I. (2022): Kirigami-inspired automatically self-inclining bifacial solar cell arrays to enhance energy yield under both sunny and cloudy conditions. In: *iScience* 25 (7), S. 104649. DOI: 10.1016/j.isci.2022.104649.

Zahrawi, Amro A.; Aly, Aly Mousaad (2024): A Review of Agrivoltaic Systems: Addressing Challenges and Enhancing Sustainability. In: *Sustainability* 16 (18), S. 8271. DOI: 10.3390/su16188271.

Zainali, Sebastian; Lu, Silvia Ma; Fernández-Solas, Álvaro; Cruz-Escabias, Alejandro; Fernández, Eduardo F.; Zidane, Tekai Eddine Khalil et al. (2025): Modelling, simulation, and optimisation of agrivoltaic systems: a comprehensive review. In: *Applied Energy* 386, S. 125558. DOI: 10.1016/j.apenergy.2025.125558.

Zainol Abidin, Mohd Ashraf; Mahyuddin, Muhammad Nasiruddin; Mohd Zainuri, Muhammad Ammirul Atiqi (2021): Solar Photovoltaic Architecture and Agronomic Management in Agrivoltaic System: A Review. In: *Sustainability* 13 (14), S. 7846. DOI: 10.3390/su13147846.

Zamfir, Mariana; Manea, Marinela Daniela; Ionescu, Luiza (2016): Return on Investment – Indicator for Measuring the Profitability of Invested Capital. In: *Valahian Journal of Economic Studies* 7 (2), S. 79–86. DOI: 10.1515/vjes-2016-0010.

Zarhloule, Yassine; Rimi, Abedkrim; Boughriba, Mimoun; Barkaoui, Alae Eddine; Lahrach; Abderrahim (2010): The Geothermal Research in Morocco: History of 40 Years. Online verfügbar unter <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/0110.pdf>, zuletzt geprüft am 04.12.2024.

Zhang, Jie; Gu, Min; Chen, Xi (2023a): Supercapacitors for renewable energy applications: A review. In: *Micro and Nano Engineering* 21, S. 100229. DOI: 10.1016/j.mne.2023.100229.

Zhang, Wenyuan; Shi, Zhengrong; Zhang, Tao (2023b): Design of A Mobile Photovoltaic Direct-drive Refrigeration Compartment. In: *Journal of Physics: Conference Series* 2503 (1), S. 12034. DOI: 10.1088/1742-6596/2503/1/012034.

Zhong, Jianmei; Zhang, Wei; Xie, Lingzhi; Zhao, Oufan; Wu, Xin; Zeng, Xiding; Guo, Jiahong (2023): Development and challenges of bifacial photovoltaic technology and application in buildings: A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 187, S. 113706. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113706.

Zhu, Ziyang; Liu, Yu; Zhang, Hualiang; Xu, Yujie; Shao, Zongping; Ge, Lei et al. (2025): Emerging trends in electrochemical energy storage: A focus on low-temperature pseudocapacitors. In: *Energy Reviews* 4 (1), S. 100118. DOI: 10.1016/j.enrev.2024.100118.

Zitan, Houda; Chafik, Khalid (2021): Literature review synthesis on predictors of Green IoT irrigation adoption in Morocco: Theoretical construct essay | International Conference on Data Science, E-learning and Information Systems 2021. Online verfügbar unter <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3460620.3460763>, zuletzt aktualisiert am 02.04.2025, zuletzt geprüft am 02.04.2025.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei allen bedanken, die mich während der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. Wydra für die engagierte Betreuung und die sorgfältige Begutachtung meiner Masterarbeit. Ihre wertvollen Anregungen und ihre konstruktive Kritik während des gesamten Entstehungsprozesses waren von großer Bedeutung. Ich bin ihr auch sehr dankbar für ihr Engagement während meines Studiums, durch das mein Interesse an den Herausforderungen des Klimawandels, seiner gesellschaftlichen Relevanz und möglichen Lösungsansätzen nachhaltig geweckt wurde.

Ein herzliches Dankeschön gilt meinen Eltern, die mir durch ihre unermüdliche Unterstützung das Studium erst ermöglicht haben und mir in dieser intensiven Phase stets den Rücken gestärkt haben.

In tiefer Dankbarkeit bin ich meiner Frau Majda verbunden. Sie hat mich während des gesamten Entstehungsprozesses begleitet und unterstützt. Ihre emotionale Unterstützung war dabei ebenso wichtig wie ihre Bereitschaft, sich mit mir über meine Arbeit auszutauschen.

Nicht zuletzt danke ich meinen Freunden Radouane, Mustapha, El Mostafa und Hicham für ihre stetige Unterstützung und Freundschaft. Sie haben mir während der gesamten Zeit Kraft und Motivation gegeben.

Erfurt, 28.05.2025

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die Prüfung selbständig und nur unter Verwendung der erlaubten Hilfsmittel bearbeitet habe. Insbesondere versichere ich, keine Hilfe anderer Personen oder textgenerierende KI-Tools bei der Anfertigung in Anspruch genommen zu haben. Mit Abgabe der vorliegenden Leistung übernehme ich die Verantwortung für die Inhalte und Ergebnisse der Arbeit. Mir ist bekannt, dass eine unwahre Erklärung rechtliche Folgen hat und insbesondere dazu führen kann, dass die Prüfung als nicht bestanden bewertet wird. Darüber hinaus ist mir bekannt, dass ich im Wiederholungsfalle oder in schwerwiegenden Fällen von der Erbringung von weiteren Prüfungsleistungen ausgeschlossen werden kann (§ 20 Abs. 3 Rahmenprüfungs- und Rahmenstudienordnung). Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Erfurt, den 28.05.2025

Yacine Aseri