
Versorgung eines Industrielandes mit erneuerbaren Energien am Beispiel Deutschlands



Hans-Martin Henning

Fraunhofer-Institut für Solare
Energiesysteme ISE

Festvortrag zum 25-jährigen Jubiläum
AEE-INTEC

Gleisdorf, 28. Juni 2013

www.ise.fraunhofer.de

© Fraunhofer ISE



Inhaltsübersicht

- Klimaschutz – eine globale Herausforderung
- Energiesystem Deutschland auf Basis regenerativer Energien – ein Blick in das Jahr 2050
 - Methodik
 - Ergebnisse Energie
 - Ergebnisse Kosten
 - Fazit
- Zusammenfassung

© Fraunhofer ISE



Inhaltsübersicht

- **Klimaschutz – eine globale Herausforderung**
- Energiesystem Deutschland auf Basis regenerativer Energien – ein Blick in das Jahr 2050
 - Methodik
 - Ergebnisse Energie
 - Ergebnisse Kosten
 - Fazit
- Zusammenfassung

© Fraunhofer ISE



Warum brauchen wir eine Energiewende?

Mittel- bis langfristig

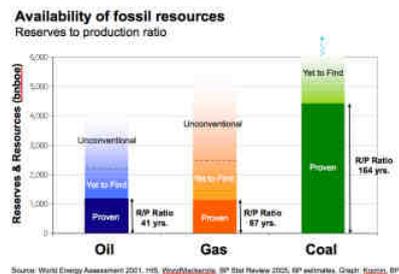
- Begrenztheit fossiler Energieträger

Kurzfristig

- Begrenzte Kapazität der Atmosphäre zur Aufnahme von Treibhausgasen ohne dramatische Folgen für Veränderung des globalen Klimas

Herausforderung

- Ein erheblicher Teil der in der Erdkruste vorhandenen (bekannten und noch nicht bekannten) fossilen Energieträger muss dort verbleiben



© Fraunhofer ISE



Atmosphärische CO₂-Konzentration

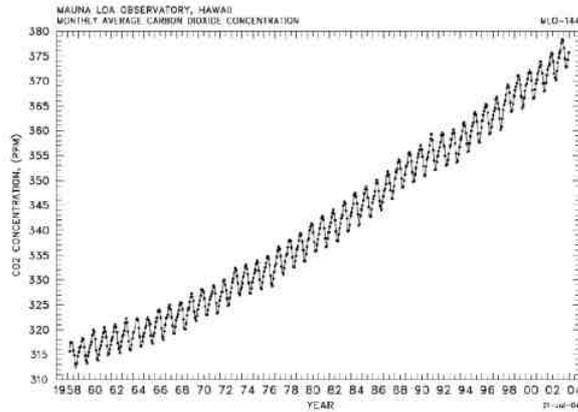
C.D. Keeling and T.P. Whorf

Carbon Dioxide Research Group, Scripps Institution of Oceanography,
University of California, La Jolla, California 92093-0444, U.S.A.

Atmospheric CO₂ Record from Mauna Loa

Period of Record

1958-2003



© Fraunhofer ISE

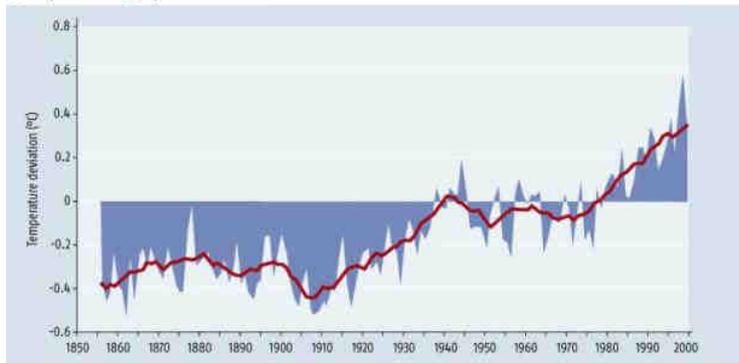
Fraunhofer
ISE

Globaler Temperaturanstieg

THE WORLD IS GETTING WARMER

Temperature plotted as the deviation from the 1960 to 1990 average

● Yearly deviation ● 10-year smoothed trend

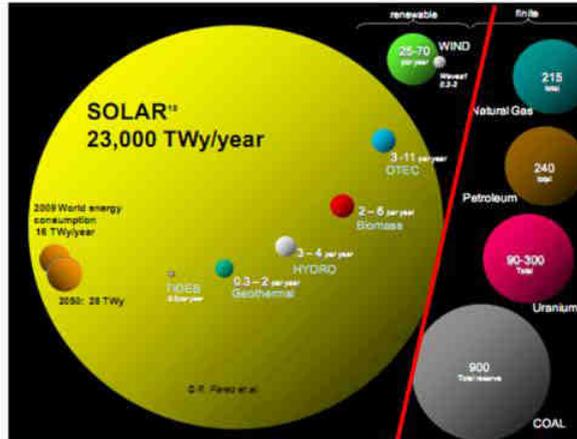


© Fraunhofer ISE

Fraunhofer
ISE

Globale Energie-Ressourcen

World Energy Resources (1Twy = 8760 TWhr)



Erneuerbare Energien bieten die Lösung

Aber wie kann die Umsetzung konkret aussehen?

© Fraunhofer ISE

Fraunhofer
ISE

Energiewende Deutschland – nationaler Konsens Ziele der deutschen Bundesregierung für 2050

Insgesamt

- Reduktion der Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 % (bezogen auf 1990)
- Halbierung des Primärenergieverbrauchs (bezogen auf 2008)
- Erneuerbare Energien Anteil von 60 % am Bruttoendenergieverbrauch

Strom

- Reduktion um 25 % (bezogen auf 2008)
- Anteil erneuerbare Energien am Bruttostromverbrauch 80 %

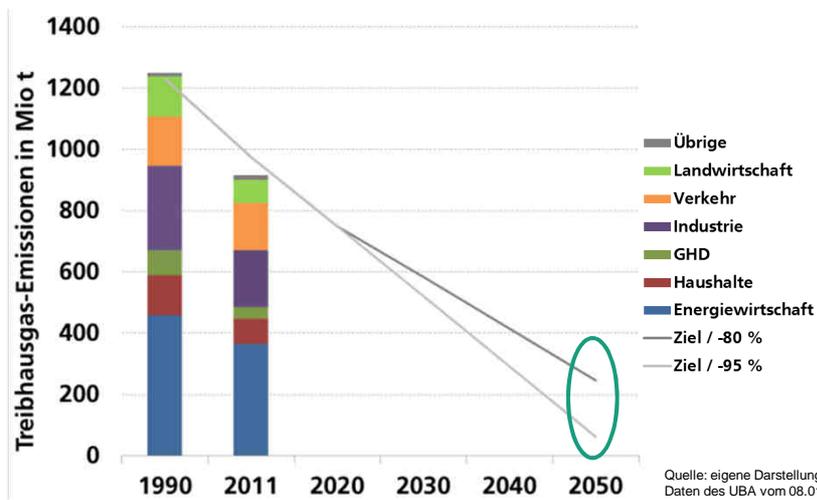
Gebäudesektor

- Nahezu „klimaneutraler Gebäudesektor“
- Reduktion Primärenergie um 80 %

© Fraunhofer ISE

Fraunhofer
ISE

(Soll-) Entwicklung Treibhausgas-Emissionen Deutschland



© Fraunhofer ISE

Inhaltsübersicht

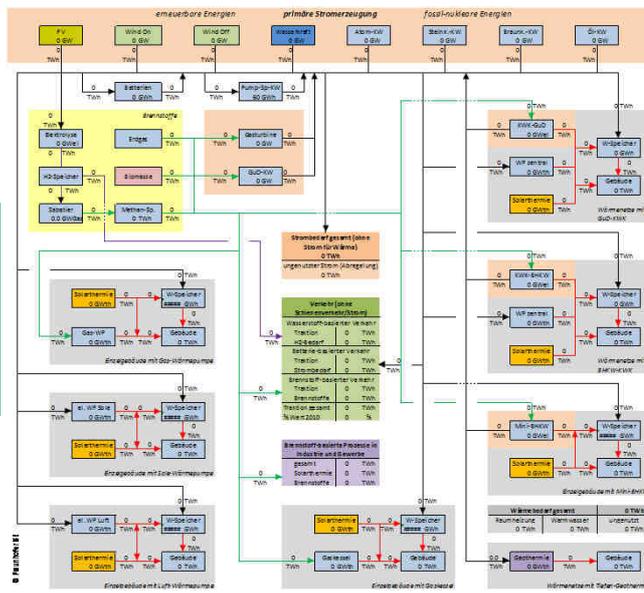
- Klimaschutz – eine globale Herausforderung
- **Energiesystem Deutschland auf Basis regenerativer Energien – ein Blick in das Jahr 2050**
 - **Methodik**
 - Ergebnisse Energie
 - Ergebnisse Kosten
 - Fazit
- Zusammenfassung

© Fraunhofer ISE

Modellierung

Der Versuch eines Blicks in die Zukunft – mögliche Struktur eines Energiesystems mit dominanten Anteil erneuerbarer Energien

Regenerative Energien Modell – Deutschland REMod-D



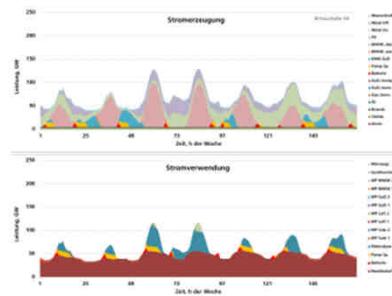
© Fraunhofer ISE

Fraunhofer ISE

Modell REMod-D

Jahres-Energiebilanz eines möglichen deutschen Energiesystems

- auf Basis stündlicher Werte für
 - Strom („Kupferplatte“, Netzausbaukosten berücksichtigt)
 - Raumwärme, Warmwasser
 - Motorisierter Individual-Verkehr (Batterie, Wasserstoff)
- unter Einbeziehung in jährliche Bilanz
 - Brennstoffe für Prozesse in Gewerbe und Industrie
 - Brennstoffe für Schwerlastverkehr und Luftverkehr



© Fraunhofer ISE

Fraunhofer ISE

Modell-Ansatz

Exogene Vorgaben

CO₂-Emissionen →
verfügbare Menge
fossiler Energieträger

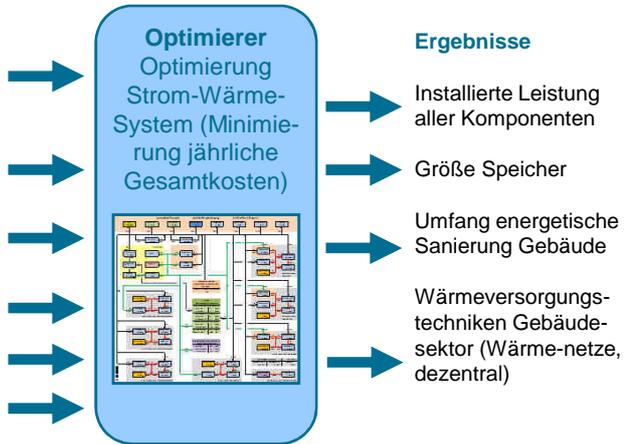
Strombedarf (ohne Strom
für MIV und Wärme)

Prozesswärmebedarf
Industrieprozesse

Energiebedarf Verkehr

Verfügbare Biomasse

Konventionelle KW



Ergebnisse

Installierte Leistung
aller Komponenten

Größe Speicher

Umfang energetische
Sanierung Gebäude

Wärmeversorgungs-
techniken Gebäude-
sektor (Wärme-netze,
dezentral)

© Fraunhofer ISE

Fraunhofer
ISE

Stromerzeugung

Erneuerbare

Wind
onshore



Wind
offshore



Photo-voltaik



Wasserkraft



Komplementäre Stromerzeugung

Konventionelle
Kraftwerke



Kraft-Wärme-
Kopplung (ver-
schiedene Größen)



Neue GuD-
Kraftwerke



© Fraunhofer ISE

Fraunhofer
ISE

Raumwärme/Warmwasser

Strom-basiert

Elektrische Wärmepumpen



Heizstab (nur Überschuss)

Solarthermie (Einzelgebäude, Wärmenetze)



Brennstoff-basiert

(Brennwert-) Kessel



Gas-Wärmepumpen



Kraft-Wärme-Kopplung (Wärmenetze, dezentral)



© Fraunhofer ISE

Fraunhofer ISE

Zukünftige Techniken für motorisierten Individualverkehr auf Basis Strom

Batterie

- + Hohe Effizienz
- Niedrige Reichweite
- Keine Langzeitspeicherung im System



Wasserstoff

- + Hohe Reichweite
- + Langzeitspeicher im System
- Geringere Effizienz



© Fraunhofer ISE

Fraunhofer ISE

Energiespeicher

Strom direkt

Pumpspeicher-
Kraftwerke



Batterien



Wärme

Große
Wärmespeicher in
Wärmenetzen



Chemisch (Power-to-Gas)

Wasserstoff



Methan



Pufferspeicher in
Gebäuden



© Fraunhofer ISE

 **Fraunhofer**
ISE

Wichtigste Randbedingungen / Annahmen für Zieljahr 2050

- Nachhaltiges Biomassepotenzial 335 TWh
- Mobilität: Fahrleistung (Traktionsenergie) gleichbleibend
 - 30 % Batterie-basiert (Kurzstrecken individual, urban)
 - 30 % Wasserstoff / Brennstoffzelle (Langstrecken individual, öffentlicher Nahverkehr urban)
 - 40 % Brennstoffe (vor allem Schwerlast und Luftfahrt)
- Stromverbrauch (ohne Strom für Wärme und motorisierten Individualverkehr) um 25 % reduziert: 500 TWh/a → 375 TWh/a

© Fraunhofer ISE

 **Fraunhofer**
ISE

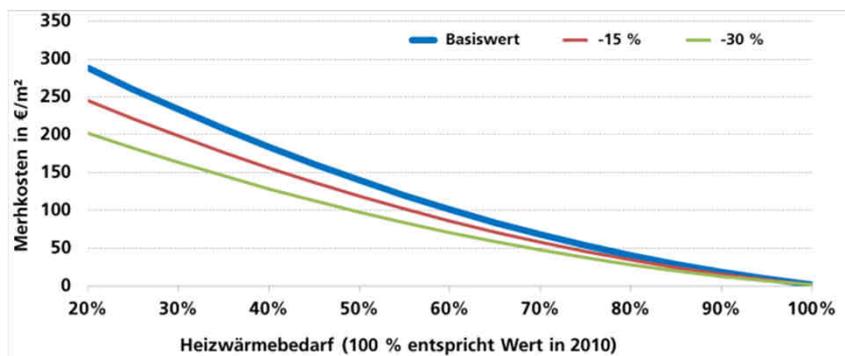
Wichtigste Randbedingungen / Annahmen für Zieljahr 2050

- Gleichbleibender Brennstoffbedarf für Gewerbe- und Industrieprozesse (entspricht Entwicklung der vergangenen 20 Jahre)
- Langfristkosten aller Technologien (Quelle für meiste Technologien: IEA energy technology outlook 2012)
- Energie-bedingte CO₂-Emissionen um 86 % abgesenkt gegenüber Referenzwert 1990 → determiniert Restmenge fossiler Brennstoffe

© Fraunhofer ISE



Mehrkosten energetische Sanierung



Mehrkosten bezogen auf Sanierung ohne energetische Maßnahmen (Pinselsanierung)

© Fraunhofer ISE



Inhaltsübersicht

- Klimaschutz – eine globale Herausforderung
- **Energiesystem Deutschland auf Basis regenerativer Energien – ein Blick in das Jahr 2050**
 - Methodik
 - **Ergebnisse Energie**
 - Ergebnisse Kosten
 - Fazit
- Zusammenfassung

© Fraunhofer ISE



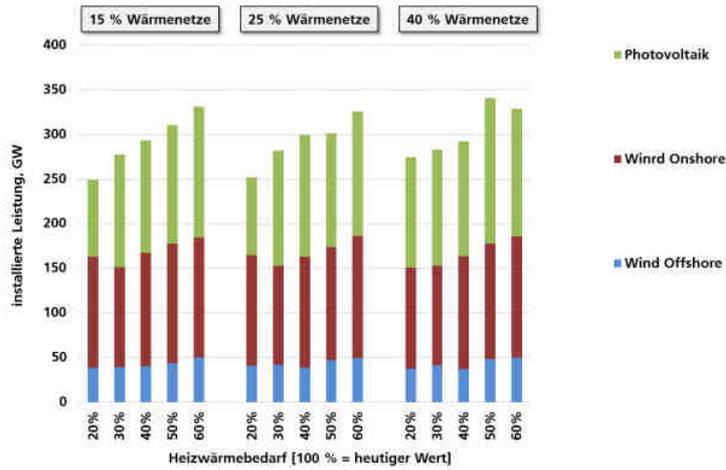
Parameterstudie – Zielsysteme 2050

- Energetische Sanierung
- Wärmenetze
- Kosten Solarthermie

© Fraunhofer ISE



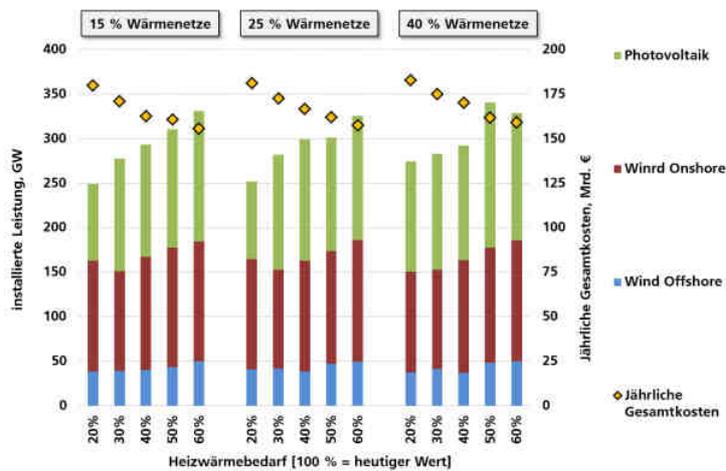
Fluktuierende erneuerbare Energien (FEE) Strom Installierte Leistung in GW



© Fraunhofer ISE

Fraunhofer ISE

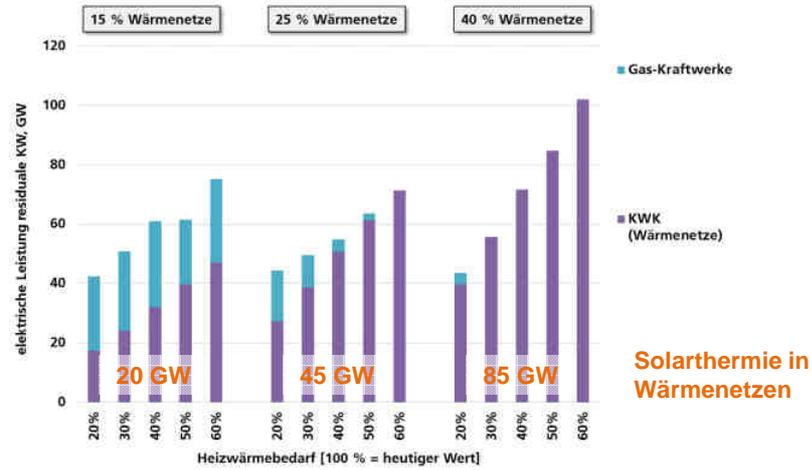
Jährliche Gesamtkosten in Mrd. € Re-Investition, Erhalt, Wartung, Betrieb, Finanzierung



© Fraunhofer ISE

Fraunhofer ISE

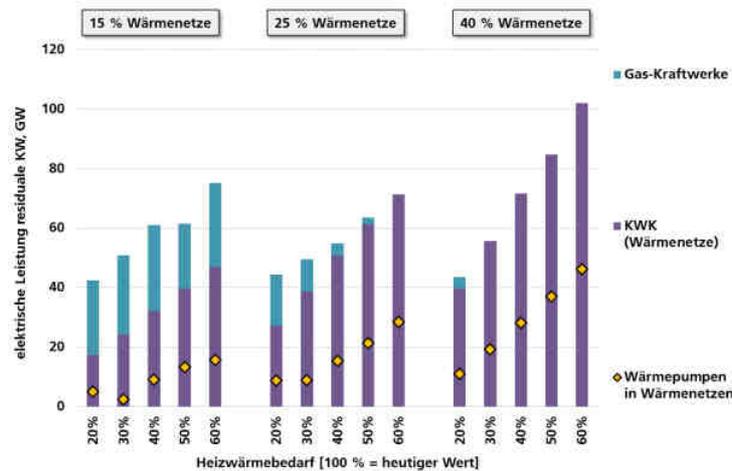
Benötigte Leistung komplementäre Stromerzeugung Installierte Leistung in GW



© Fraunhofer ISE

Fraunhofer ISE

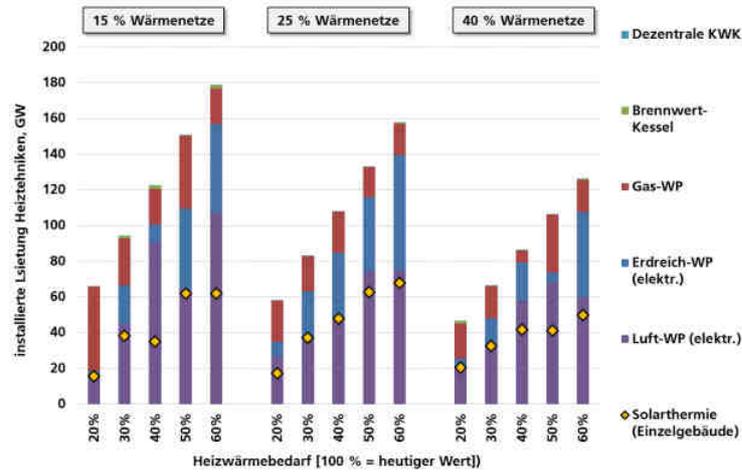
Großwärmepumpen in Wärmenetzen Installierte Leistung in GW



© Fraunhofer ISE

Fraunhofer ISE

Dezentrale Wärmeversorgung Installierte Leistung in GW_{th}



© Fraunhofer ISE

Fraunhofer
ISE

Sensitivitätsanalyse Kosten* Solarthermie

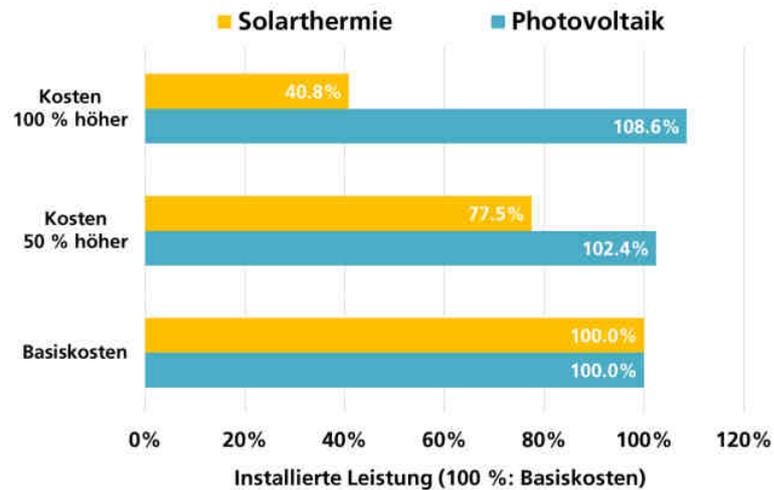
Variante	Dezentral (Einzelgebäude)		Zentral (Wärmenetze)	
	€/m ²	€/kW	€/m ²	€/kW
Basiskosten 2050	270	386	140	200
50 % höher	405	579	210	300
100 % höher	540	771	280	400

*Systemkosten inkl. Installation ohne Speicher

© Fraunhofer ISE

Fraunhofer
ISE

Kosten Solarthermie

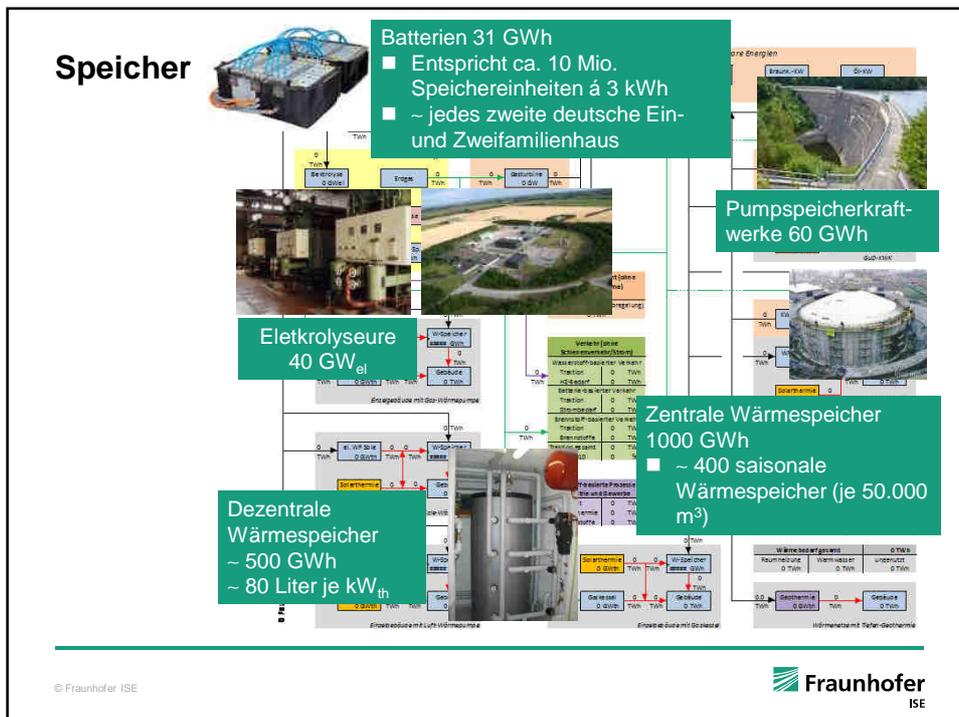
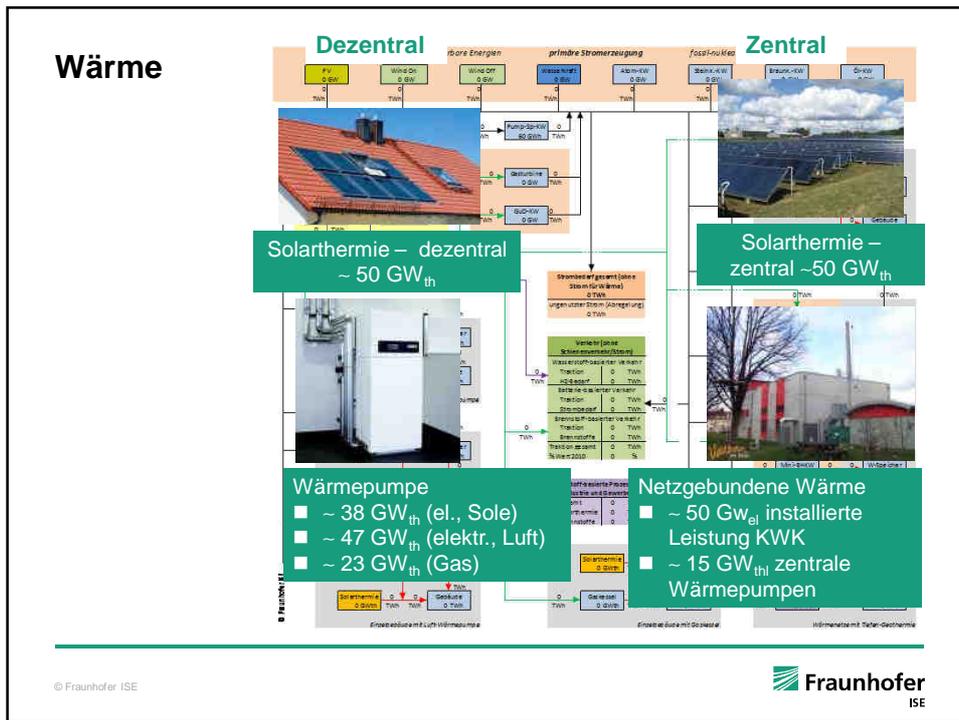


© Fraunhofer ISE

Ein mögliches, sinnvolles Zielsystem

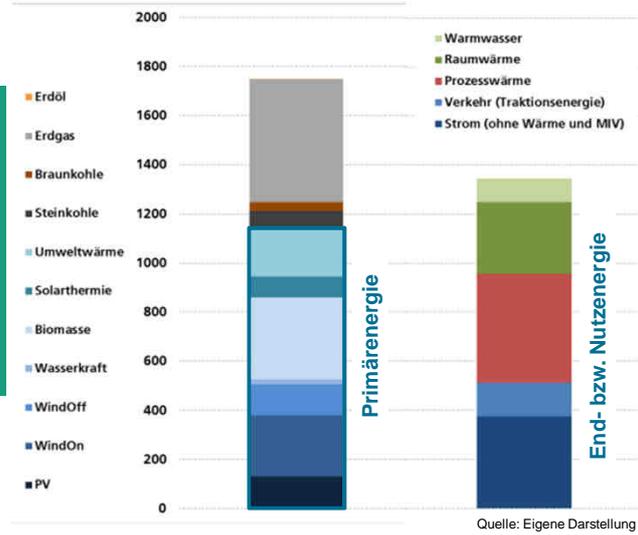
- Energetische Sanierung auf 40 % des heutigen Heizwärmebedarfs
 - Sinnvolle Größe Wandler fluktuierende erneuerbare Energien (Wind offshore 39 GW, Wind Onshore 124 GW, Photovoltaik 136 GW)
- Wärmenetze decken 25 % des Wärmebedarfs von Gebäuden → moderater Ausbau Wärmenetze
 - Abdeckung des Wärmebedarfs verdichteter, innenstädtischer Räume, in denen Installation von Wärmepumpen schwierig erscheint (Wärmequellen)

© Fraunhofer ISE



Jährliche Gesamtenergiebilanz (TWh)

Anteil erneuerbarer Energien am PE-Aufkommen: **66 %**
 Reduktion CO₂-Emissionen des Energiesektors (Bezugsj. 1990): **86 %**

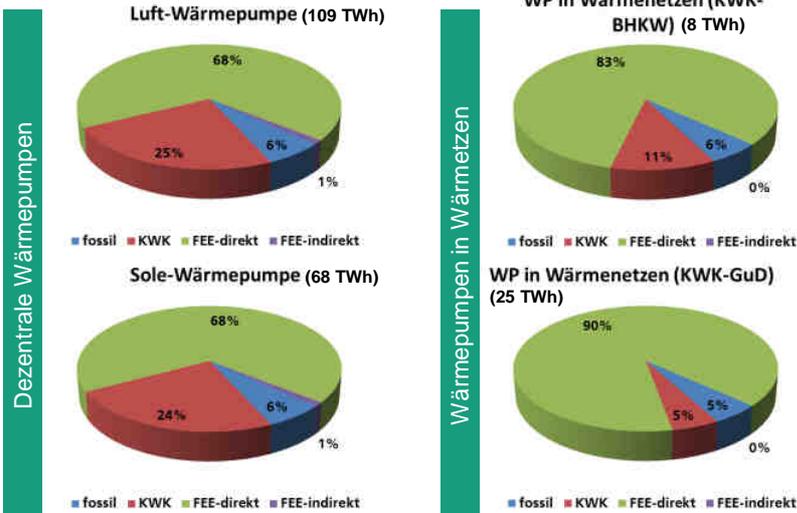


Quelle: Eigene Darstellung

© Fraunhofer ISE



Stromherkunft elektrische Wärmepumpen



Quelle: Eigene Darstellung

© Fraunhofer ISE



FEE = fluktuierende erneuerbare Energien

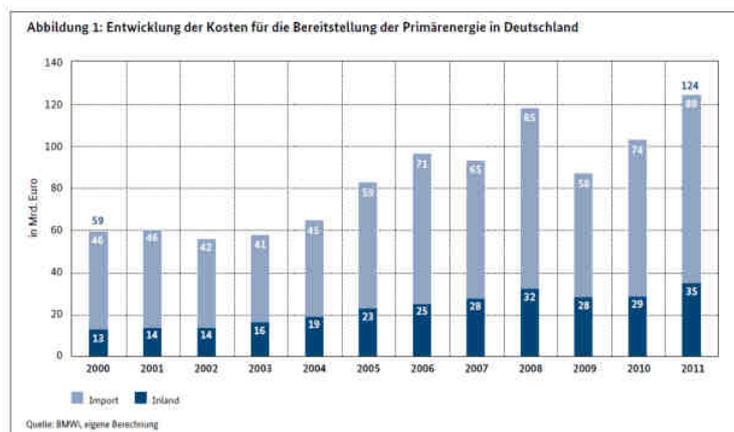
Inhaltsübersicht

- Klimaschutz – eine globale Herausforderung
- **Energiesystem Deutschland auf Basis regenerativer Energien – ein Blick in das Jahr 2050**
 - Methodik
 - Ergebnisse Energie
 - **Ergebnisse Kosten**
 - Fazit
- Zusammenfassung

© Fraunhofer ISE



Primärenergie D - Kosten

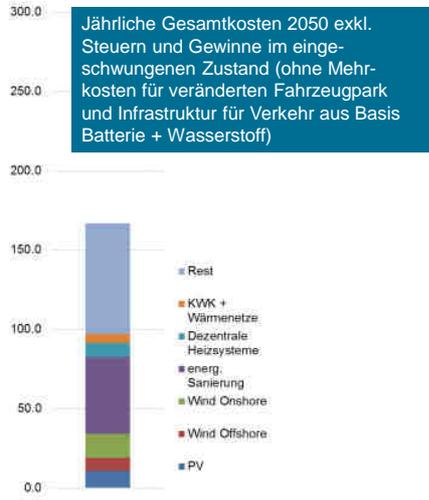


Quelle: Die Energiewende in Deutschland. Mit sicherer, bezahlbarer und umweltschonender Energie ins Jahr 2050. BMWi, Februar 2012

© Fraunhofer ISE



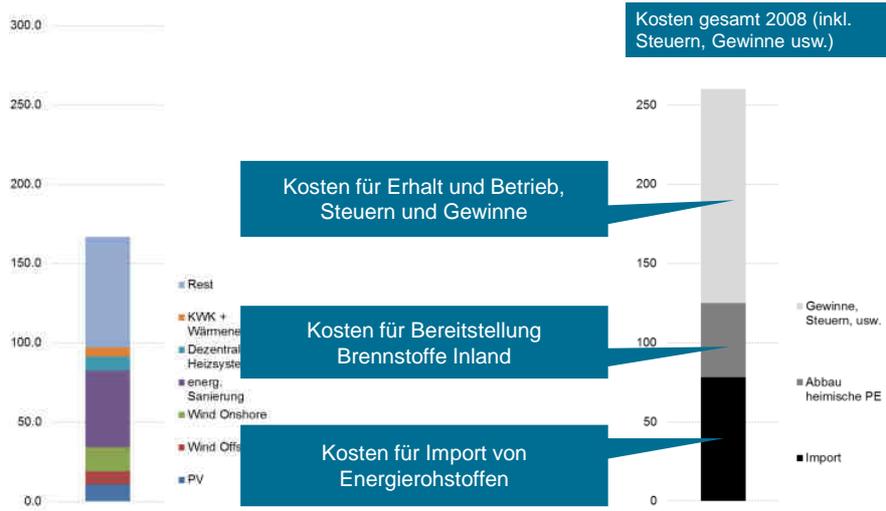
Kostenvergleich



© Fraunhofer ISE



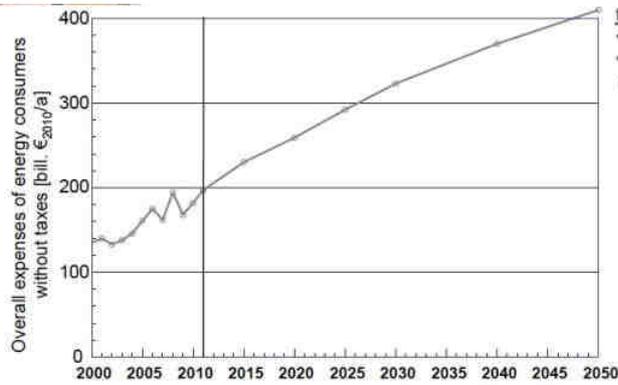
Kostenvergleich



© Fraunhofer ISE



Kosten Energiewende



forward projection of status quo:
 •constant energy consumption
 •no additional investment for energy efficiency and renewable energy

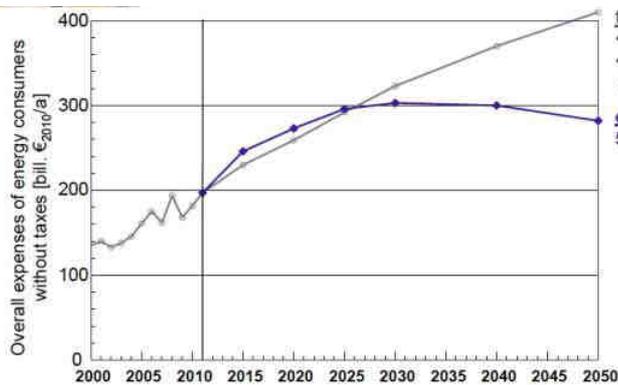
Slide courtesy F. Staiss 2013, based on data from BMU



© Fraunhofer ISE



Kosten Energiewende



forward projection of status quo:
 •constant energy consumption
 •no additional investment for energy efficiency and renewable energy

energy transition, part 1
 50% reduction of energy consumption

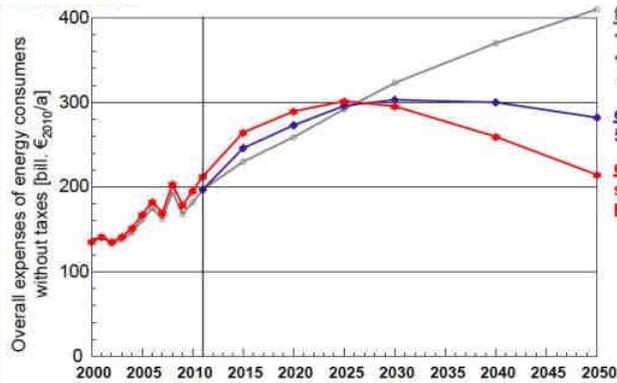
Slide courtesy F. Staiss 2013, based on data from BMU



© Fraunhofer ISE



Kosten Energiewende



forward projection of status quo:
 •constant energy consumption
 •no additional investment for energy efficiency and renewable energy

energy transition, part 1
 50% reduction of energy consumption

energy transition, part 2
 substitution of fossil energy carriers by renewable energy

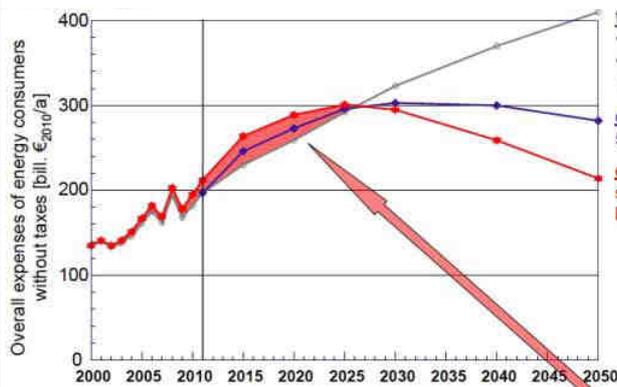
Slide courtesy F. Staiss 2013, based on data from BMU



© Fraunhofer ISE



Kosten Energiewende



forward projection of status quo:
 •constant energy consumption
 •no additional investment for energy efficiency and renewable energy

energy transition, part 1
 50% reduction of energy consumption

energy transition, part 2
 substitution of fossil energy carriers by renewable energy

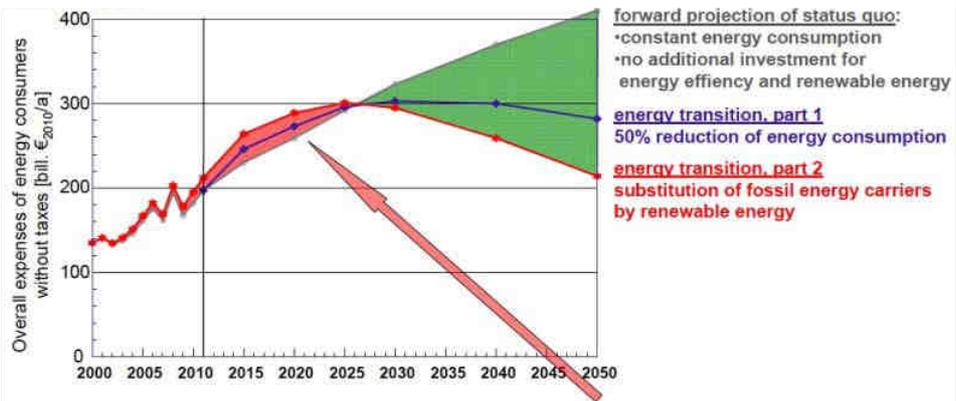
Slide courtesy F. Staiss 2013, based on data from BMU



© Fraunhofer ISE



Kosten Energiewende



Slide courtesy F. Staiss 2013, based on data from BMU



© Fraunhofer ISE

Fraunhofer
ISE

Inhaltsübersicht

- Klimaschutz – eine globale Herausforderung
- **Energiesystem Deutschland auf Basis regenerativer Energien – ein Blick in das Jahr 2050**
 - Methodik
 - Ergebnisse Energie
 - Ergebnisse Kosten
 - **Fazit**
- Zusammenfassung

© Fraunhofer ISE

Fraunhofer
ISE

Fazit

Gesamt

- Versorgung eines Industrielands wie Deutschland mit erneuerbaren Energie ist möglich
- Langfristig sind die Kosten nicht höher als diejenigen unseres heutigen Versorgungssystems
- Weitgehende Unabhängigkeit von Weltmarktpreisen fossiler Energien
- Klimaschutzziele werden erreicht

© Fraunhofer ISE

 **Fraunhofer**
ISE

Fazit

Strom

- Fluktuierende Stromerzeugung ist nicht nur Rückgrat der klassischen Strombereitstellung sondern spielt auch für Wärmeversorgung und Mobilität (Individualverkehr) zentrale Rolle
- Flexibilisierung der Stromerzeugung und –nutzung spielt zentrale Rolle
 - Kurzfristig: komplementäre Erzeugung, Pumpspeicherkraftwerke
 - Mittelfristig: Kopplung Wärmesektor, Einsatz von Wärmespeichern (WP, Strom direkt als letzte Nutzungsoption)
 - Mittel- bis langfristig: Batterien, Kopplung Verkehrssektor
 - Synthetische Brennstoffe aus EE für Strom nur bei sehr hohen Deckungsanteilen erneuerbarer Energien notwendig
- Wärmenetz-gebundene KWK-Anlagen können vollständig die komplementäre Stromerzeugung übernehmen

© Fraunhofer ISE

 **Fraunhofer**
ISE

Fazit

Wärme

- Weitgehende energetische Sanierung des Gebäudebestands ist zwar nicht kosten-optimal, reduziert jedoch deutlich den Bedarf an Wandlern fluktuierender erneuerbarer Energien
 - Reduktion Heizwärmebedarf auf rund 30-40 % des heutigen Wertes scheint ein guter Kompromiss
- Elektrische Wärmepumpen spielen dominante Rolle bei der Wärmeversorgung von Einzelgebäuden
 - Hohe Kompatibilität: Strom kommt überwiegend aus EE und wird dann sehr effizient genutzt

© Fraunhofer ISE



Fazit

Wärme

- Gas-Wärmepumpen einzige nennenswerte dezentrale Heizungstechnik, die Brennstoffe nutzt
 - Hohe Effizienz bei Ausnutzung der knappen Menge verfügbarer Brennstoffe
- Solarthermie deckt 15-20 % des Bedarfs an Niedertemperaturwärme
 - Gesamtleistung einschl. Prozesswärme rund 100-200 GW_{th} (140-280 m²)
- Mikro-KWK spielt keine Rolle
 - Weniger flexibel durch gekoppelte Erzeugung

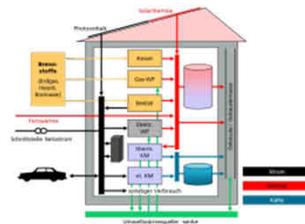
© Fraunhofer ISE



Fazit

Forschungsbedarf Wärme/Gebäude

- Kostengünstige energetische Sanierung
 - ➔ Vorfertigung
 - ➔ neue Materialien und Komponenten
- Integration von Haustechnik/aktive Solarwandler in Gebäudehülle
 - ➔ Wir benötigen mehr aktive Solarwandler (Technik) in Gebäuden
- Konzepte für mehr aktive Solarwandler in Gebäuden
- Optionen für mehr aktive Solarwandler in Gebäuden
- Kostensenkung für mehr aktive Solarwandler in Gebäuden
- ... und viele weitere



**Noch ausreichend FuE-
Bedarf für weitere 25 Jahre
AEE INTEC !!**

© Fraunhofer ISE

Fraunhofer
ISE

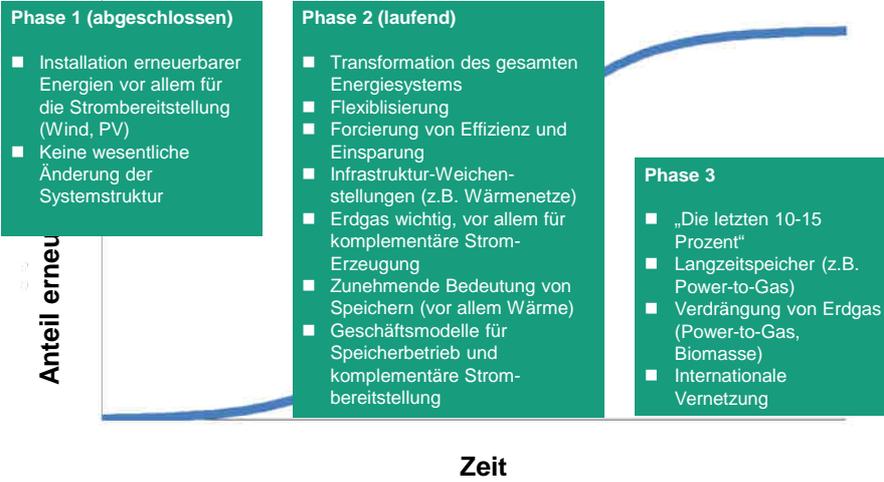
Inhaltsübersicht

- Klimaschutz – eine globale Herausforderung
- Energiesystem Deutschland auf Basis regenerativer Energien – ein Blick in das Jahr 2050
 - Methodik
 - Ergebnisse Energie
 - Ergebnisse Kosten
 - Fazit
- **Zusammenfassung**

© Fraunhofer ISE

Fraunhofer
ISE

Die Phasen der Energiewende



© Fraunhofer ISE

Zusammenfassung

- Energiewende in einem Industrieland wie Deutschland möglich und mittel- und langfristig auch mit Kostenvorteilen
- Die meisten Länder haben eher günstigere Bedingungen hinsichtlich Ressourcen erneuerbarer Energien
- Dennoch kein Selbstläufer
 - Zunächst höhere Kosten für Investitionen in Infrastruktur und Anlagen
 - Wirtschaftliche Interessen einflussreicher Industrien
 - Gesellschaftliche Akzeptanz: Stichwort »Energie-Landschaften«

© Fraunhofer ISE

Zusammenfassung

- Deutschlands Beitrag zu globalen Treibhausgas-Emissionen < 3 %
- Energiewende nur wirklich wirksam, wenn erfolgreiches Beispiel für andere Länder
 - Kostensenkungen essentiell
 - Internationale Vereinbarungen über wirksame Kosten für Emission von Treibhausgasen notwendig
- Wichtige Fragen
 - Gesellschaftliche Akzeptanz und Beteiligung
 - Ressourcenverfügbarkeit bei globaler Umsetzung



© Fraunhofer ISE

 **Fraunhofer**
ISE

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit...



Fraunhofer-Institut für Solare Energiesystems ISE

Hans-Martin Henning

www.ise.fraunhofer.de
hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de

© Fraunhofer ISE

 **Fraunhofer**
ISE

**... und herzliche Gratulation zu 25 Jahren
wichtiger und erfolgreicher Arbeit für die
Energiewende!**



Fraunhofer-Institut für Solare Energiesystems ISE

Hans-Martin Henning

www.ise.fraunhofer.de
hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de

© Fraunhofer ISE

 **Fraunhofer**
ISE