STIFTUNG
ENERGIE & KLIMASCHUTZ

Elektrische und optische FEM-Modellierung von Dünnschicht-Photovoltaikmodulen

von
Mario Zinßer

Fachrichtung: Elektrotechnik und Informationstechnik

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

Mario Zinßer

Vor der Sommerweide 11
73278 Schlierbach

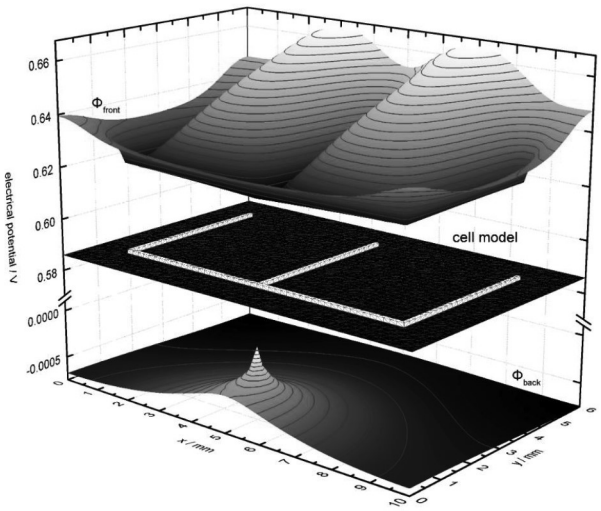
mariozinsser@freenet.de

0049 1749 13 23 73

Elektrische und optische FEM-Modellierung von Dünnschicht-Photovoltaikmodulen

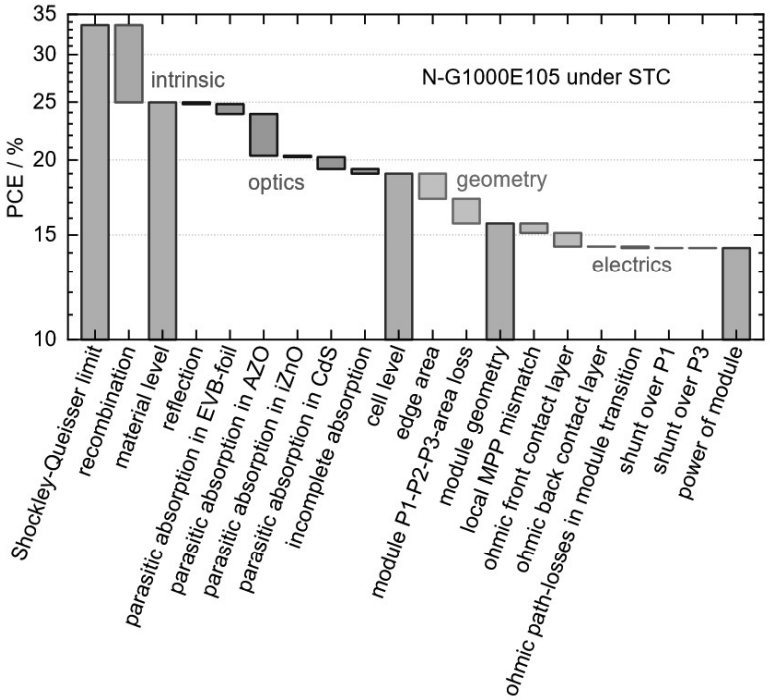
Heutzutage ist durch viele wissenschaftliche Studien nachgewiesen, dass die Erde längst dem Klimawandel unterworfen ist. Daher muss die gesamte Menschheit vereint handeln, um die schlimmsten Katastrophenszenarien zu verhindern. Ein vielversprechender Ansatz - wenn nicht sogar der vielversprechendste überhaupt - um diese angesprochene, größte Herausforderung in der Geschichte der Menschheit zu bewältigen, ist es, den Energiehunger der Menschheit durch die Erzeugung erneuerbarer Energie zu sättigen. Die Photovoltaik (PV)-Technologie ist ein vielversprechender Anwärter, die leistungsstärkste erneuerbare Energiequelle zu stellen, und spielt aufgrund ihrer direkten Umwandlung des Sonnenlichtes und ihrer skalierbaren Anwendbarkeit in Form von großflächigen Solarmodulen bereits eine große Rolle bei der Erzeugung erneuerbarer Energie. Im PV-Sektor sind Solarmodule aus Siliziumwafern die derzeit vorherrschende Technologie. Neu aufkommende PV-Gebiete wie die Dünnschichttechnologie haben jedoch vorteilhafte Eigenschaften wie einen sehr geringen Kohlenstoffdioxid (CO_2)-Fußabdruck, eine schnelle energetische Amortisierung und das Potenzial für eine kostengünstige monolithische Massenproduktion, obwohl diese derzeit noch nicht final ausgereift ist. Um die Dünnschichttechnologie jedoch gezielt in Richtung einer breiten Marktreife zu entwickeln, sind numerische Simulationen eine wichtige Säule für das wissenschaftliche Verständnis und die technologische Optimierung. Während sich traditionelle Simulationsliteratur häufig mit materialspezifischen Herausforderungen befasst, konzentriert sich diese Arbeit auf industrieorientierte Herausforderungen auf Modulebene, ohne die zugrundeliegenden Materialparameter zu verändern.

Um ein allumfassendes, digitales Modell eines Solarmoduls zu erstellen, werden in dieser Arbeit mehrere Simulationsansätze aus verschiedenen physikalischen Bereichen kombiniert. Zur Abbildung elektrischer Effekte, einschließlich der räumlichen Spannungsvariation innerhalb des Moduls, wird eine Finite Elemente Methode (FEM) zur Lösung der räumlich quantisierten Poisson-Gleichung verwendet. Um optische Effekte zu berücksichtigen, wird eine

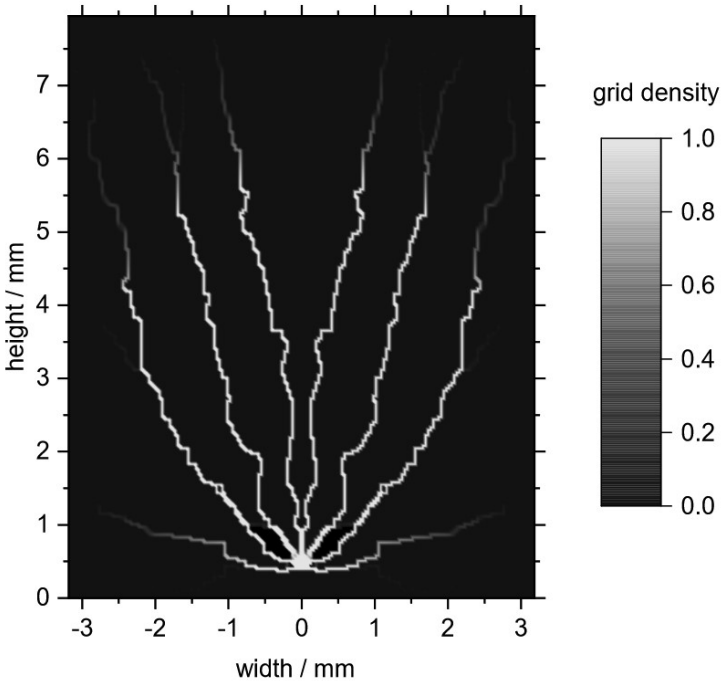


generalisierte Transfermatrix-Methode (TMM) verwendet. Alle Simulationsmethoden sind in dieser Arbeit von Grund auf neu programmiert worden, um eine Verknüpfung aller Simulationsebenen mit dem höchstmöglichen Grad an Anpassung und Verknüpfung zu ermöglichen. Die Simulationsmethodik wird durch externe Quanteneffizienz (EQE)-Messungen, experimentelle Reflexionsdaten und gemessene Strom-Spannungs (I-U)-Kennlinien verifiziert. Der Kernpunkt der Methodik dieser Arbeit ist eine ganzheitliche Simulationsmethodik auf Modulebene. Dies ermöglicht es, die Lücke zwischen der Simulation auf Materialebene über die Berechnung von Laborwirkungsgraden bis hin zur Bestimmung der von zahlreichen Umweltfaktoren beeinflusste Leistung der Module im Freifeld zu überbrücken. Durch diese Verknüpfung von Zellsimulation und Systemdesign ist es lediglich aus Laboreigenschaften möglich, das Freifeldverhalten von Solarmodulen zu prognostizieren. Sogar das Zurückrechnen von experimentellen Messungen zu Materialparameter ist mittels des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens des Reverse Engineering Fittings (REF) möglich.

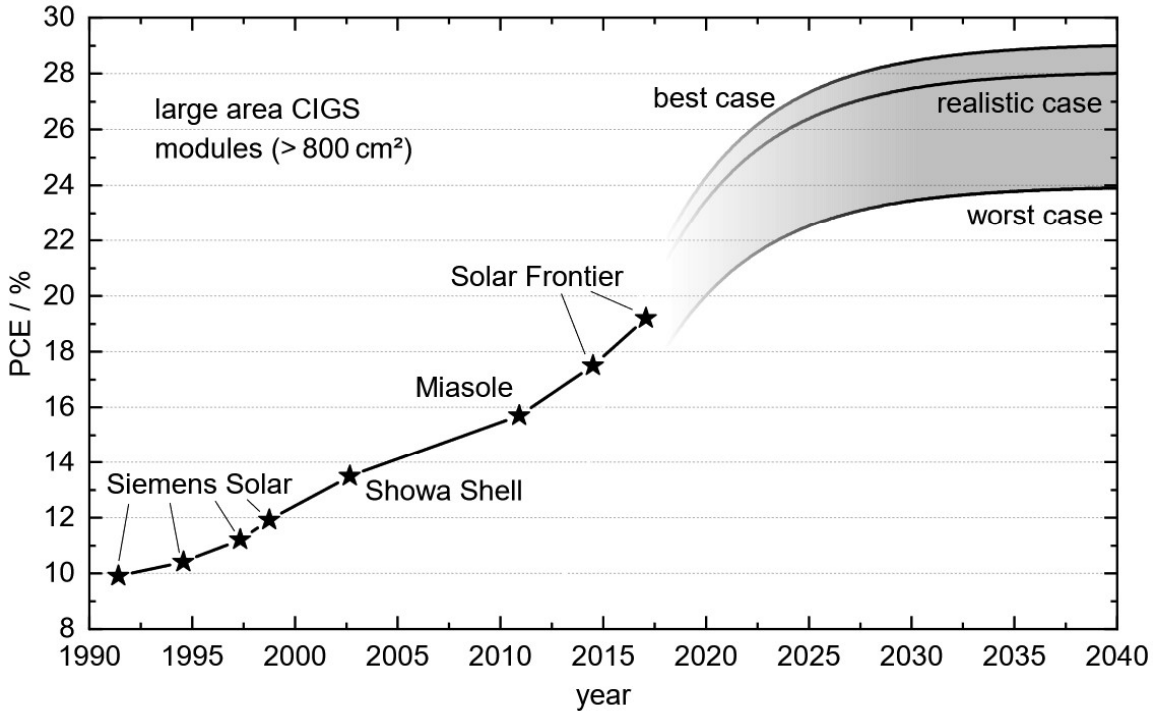
Das in dieser Arbeit entwickelte numerische Verfahren kann für mehrere Anwendungen genutzt werden. Zunächst können durch die Kombination von elektrischen und optischen Simulationen ganzheitliche Top-Down-Verlustanalysen durchgeführt werden. Dies ermöglicht eine wissenschaftliche Einordnung und einen quantitativen Vergleich aller Verlustleistungs-mechanismen auf einen Blick, was die zukünftige Forschung und Entwicklung in Richtung von technologischen Schwachstellen von Solarmodulen lenkt. Darüber hinaus ermöglicht die Kombination von Elektrik und Optik die Detektion von Verlusten, die auf dem nichtlinearen Zusammenspiel dieser beiden Ebenen beruhen und auf eine räumliche Spannungsverteilung im Solarmodul zurückzuführen sind.



Diese Arbeit verwendet die entwickelten numerischen Modelle ebenfalls für Optimierungsprobleme, die an digitalen Modellen realer Solarmodule durchgeführt werden. Häufig auftretende Fragestellungen bei der Entwicklung von Solarmodulen sind beispielsweise die Schichtdicke des vorderen optisch transparenten, elektrisch leitfähigen Oxids (TCO) oder die Breite von monolithisch integrierten Zellen. Die Bestimmung des Optimums dieser mehrdimensionalen Abwägungen zwischen optischer Transparenz, elektrischer Leitfähigkeit und geometrisch inaktiver Fläche zwischen den einzelnen Zellen ist ein Hauptmerkmal der Methodik dieser Arbeit. Mittels des FEM-Ansatzes dieser Arbeit ist es möglich, alle gegenseitigen Wechselwirkungen über verschiedene physikalische Ebenen hinweg zu berücksichtigen und ein ganzheitlich optimiertes Moduldesign zu finden. Auch topologisch komplexere Probleme, wie das Finden eines geeigneten Designs für das Metallisierungsgitter, können auf Grundlage der Simulation mittels der Methode der Topologie-Optimierung (TO) gelöst werden. In dieser Arbeit wurde das TO-Verfahren zum ersten Mal für monolithisch integrierte Zellen eingesetzt. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass sowohl einfache Optimierungen der TCO-Schichtdicken als auch Topologie-Optimierungen stark von den vorherrschenden Beleuchtungsverhältnissen abhängen. Daher ist eine Optimierung auf den Jahresertrag anstelle des Laborwirkungsgrades für industrienahe Anwendungen wesentlich sinnvoller, da die mittleren Jahreseinstrahlungen deutlich von den Laborbedingungen abweichen. Mit Hilfe dieser Ertragsoptimierung wurde in dieser Arbeit für die Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid CuIn1−xGaxSe2 (CIGS)-Technologie ein Leistungsgewinn von über 1% im Ertrag für einige geografische, terrestrische Standorte und gleichzeitig eine Materialeinsparung für die Metallisierungs- und TCO-Schicht von bis zu 50% nachgewiesen.



Mit Hilfe der numerischen Simulationen dieser Arbeit können alle denkbaren technologischen Verbesserungen auf Modulebene in das Modell eingebracht werden. Auf diese Weise wurde das aktuelle technologische Limit für CIGS-Dünnschicht-Solarmodule berechnet. Unter Verwendung der Randbedingungen der derzeit verfügbaren Materialien, Technologie- und Fertigungstoleranzen und des derzeit besten in der Literatur veröffentlichten CIGS-Materials ergibt sich ein theoretisches Wirkungsgradmaximum von 24% auf Modulebene. Das derzeit beste veröffentlichte Modul mit den gegebenen Restriktionen weist einen Wirkungsgrad von 19,2% auf. Verbessert sich der CIGS-Absorber vergleichbar mit jenem von Galliumarsenid (GaAs), ergibt sich ein erhöhtes Wirkungsgradlimit von etwa 28%. Im Falle eines idealen CIGS-Absorbers ohne intrinsische Rekombinationsverluste wird in dieser Arbeit eine maximale Effizienzobergrenze von 29% berechnet.

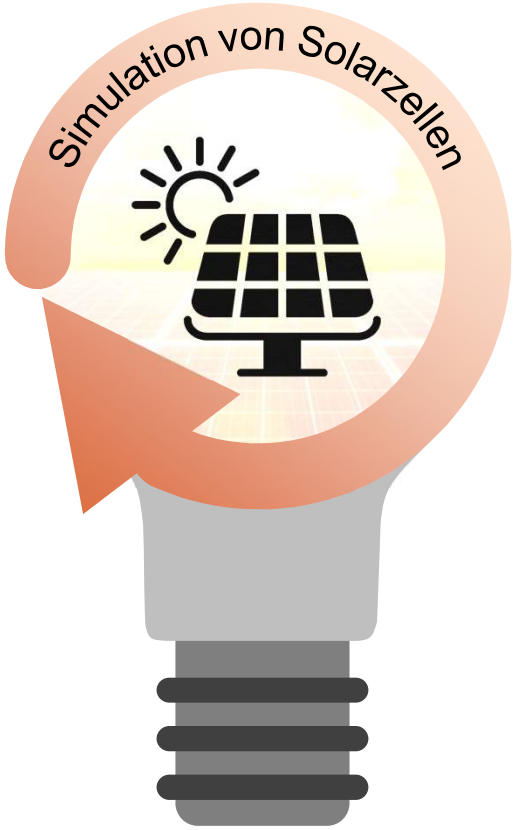


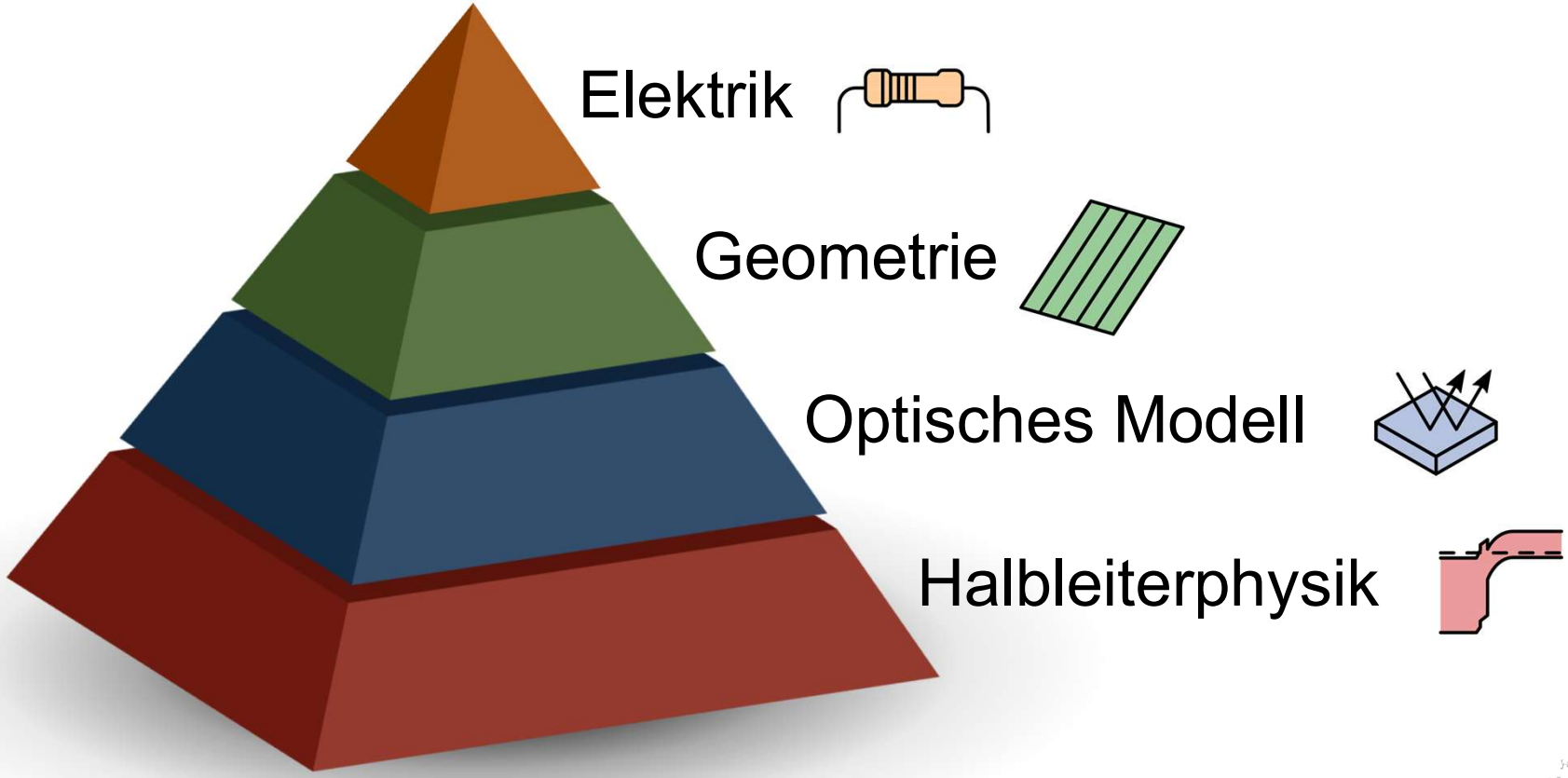
Kurz zusammengefasst lässt sich sagen, dass die in dieser Arbeit entwickelte Simulationsmethodik die beiden physikalischen Ebenen der Optik und der Elektrik in Dünnschicht-Solarmodulen in einem digitalen Modell kombiniert. Dies ermöglicht die Vorhersage von I-U-Kennlinien, die Zuordnung und Quantifizierung von Verlustmechanismen, die Optimierung von Modulgeometrien und die Bestimmung der aktuellen technologischen Grenzen der Dünnschicht-Solarmodultechnologie. Auf diese Weise verleiht diese Arbeit numerischen Dünnschicht-PV-Simulationen einen ganzheitlichen Charakter und ebnet den Weg für zukünftige Solarmodulforschung und -entwicklung und für allumfassende PV-Software.

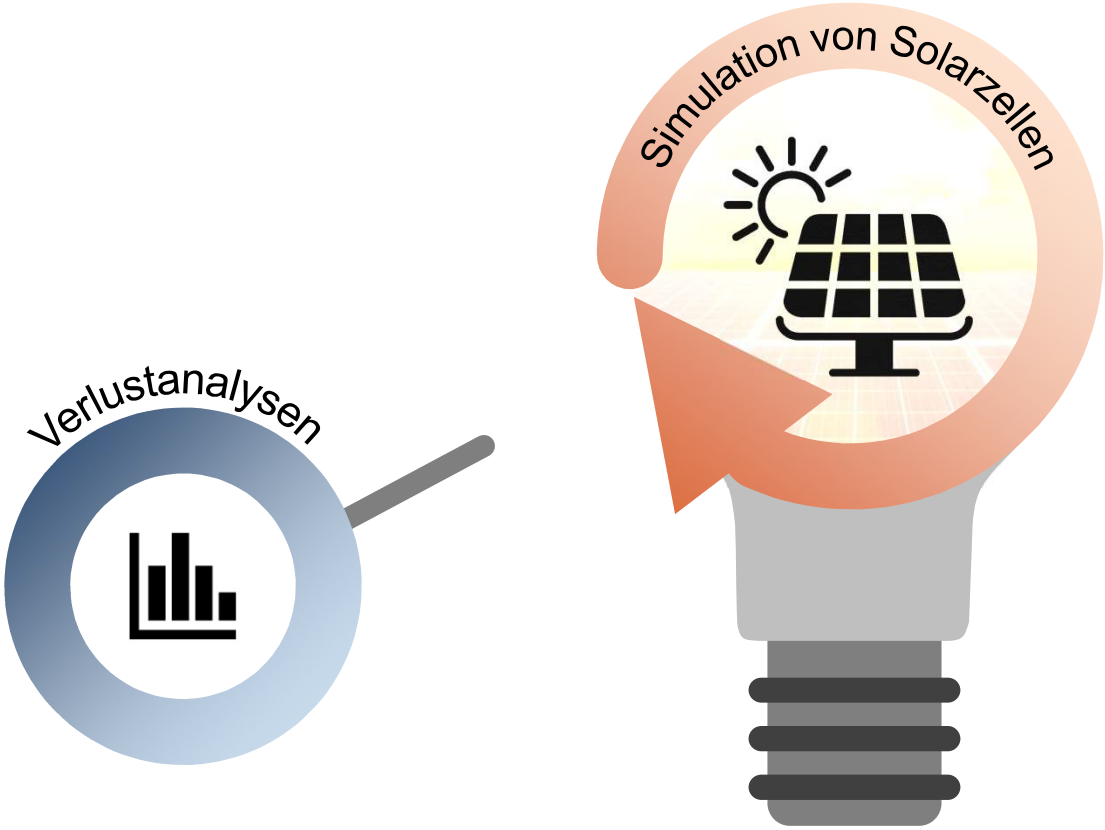
STIFTUNG ENERGIE & KLIMASCHUTZ

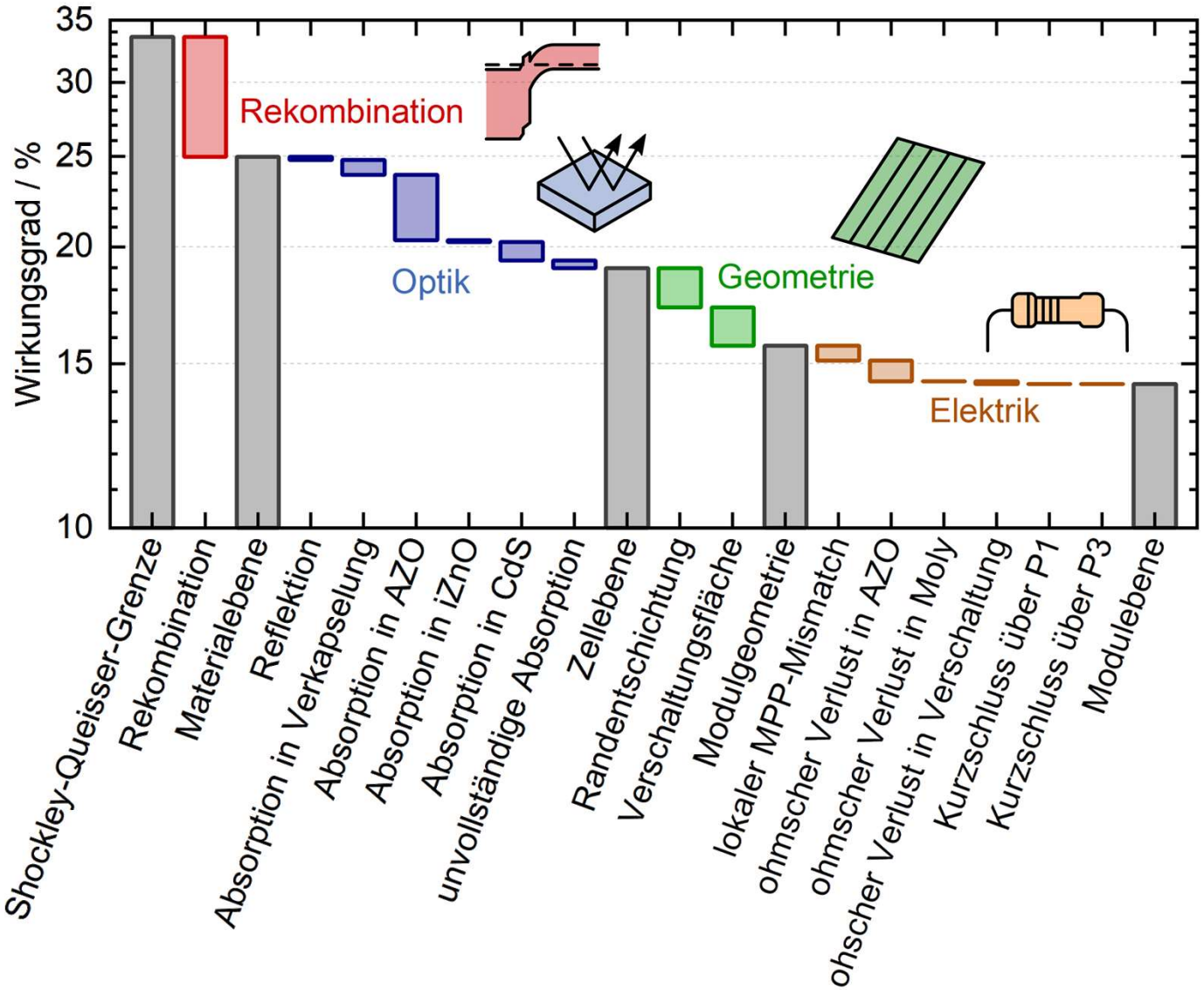
MARIO ZINßER

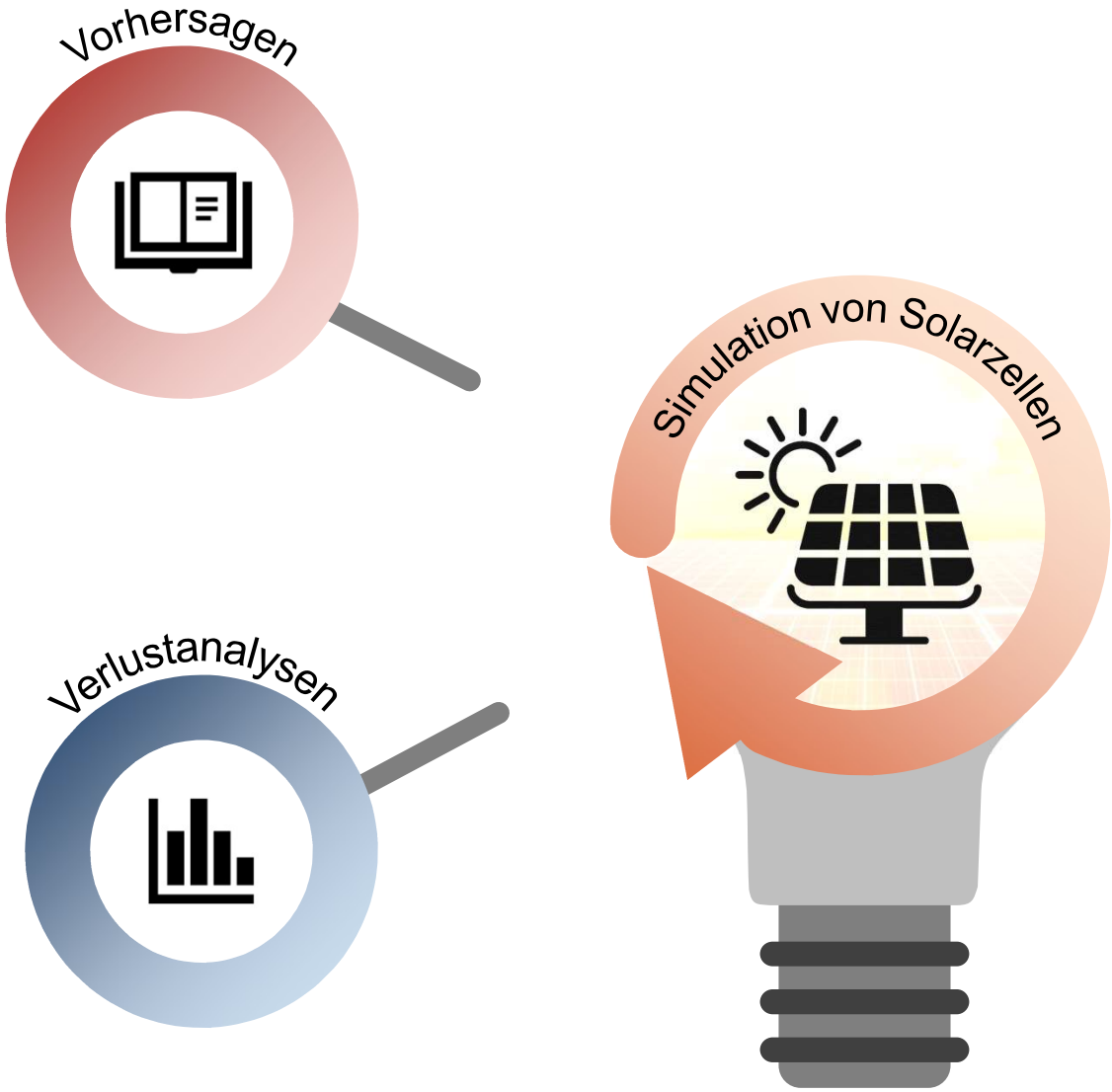
Solar
Wind
Wasser
Speicher

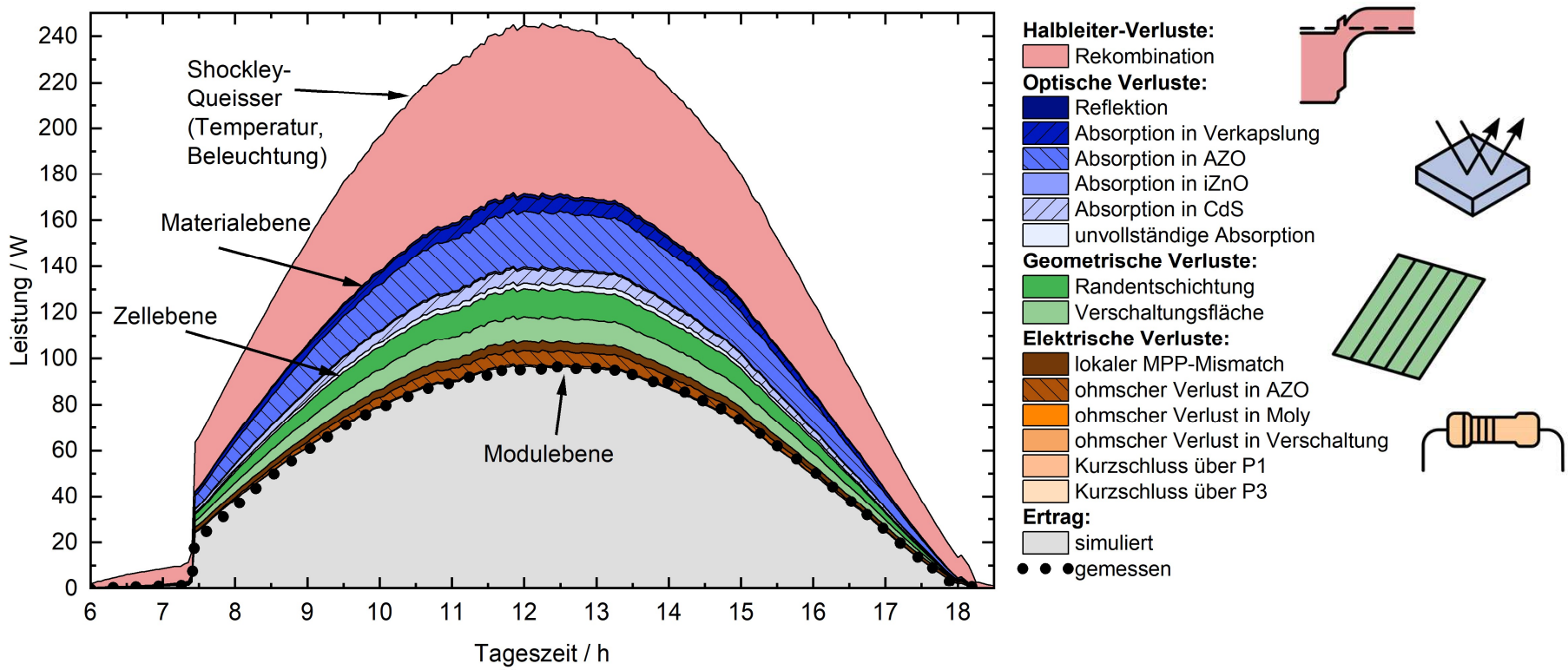

Simulation von Solarzellen

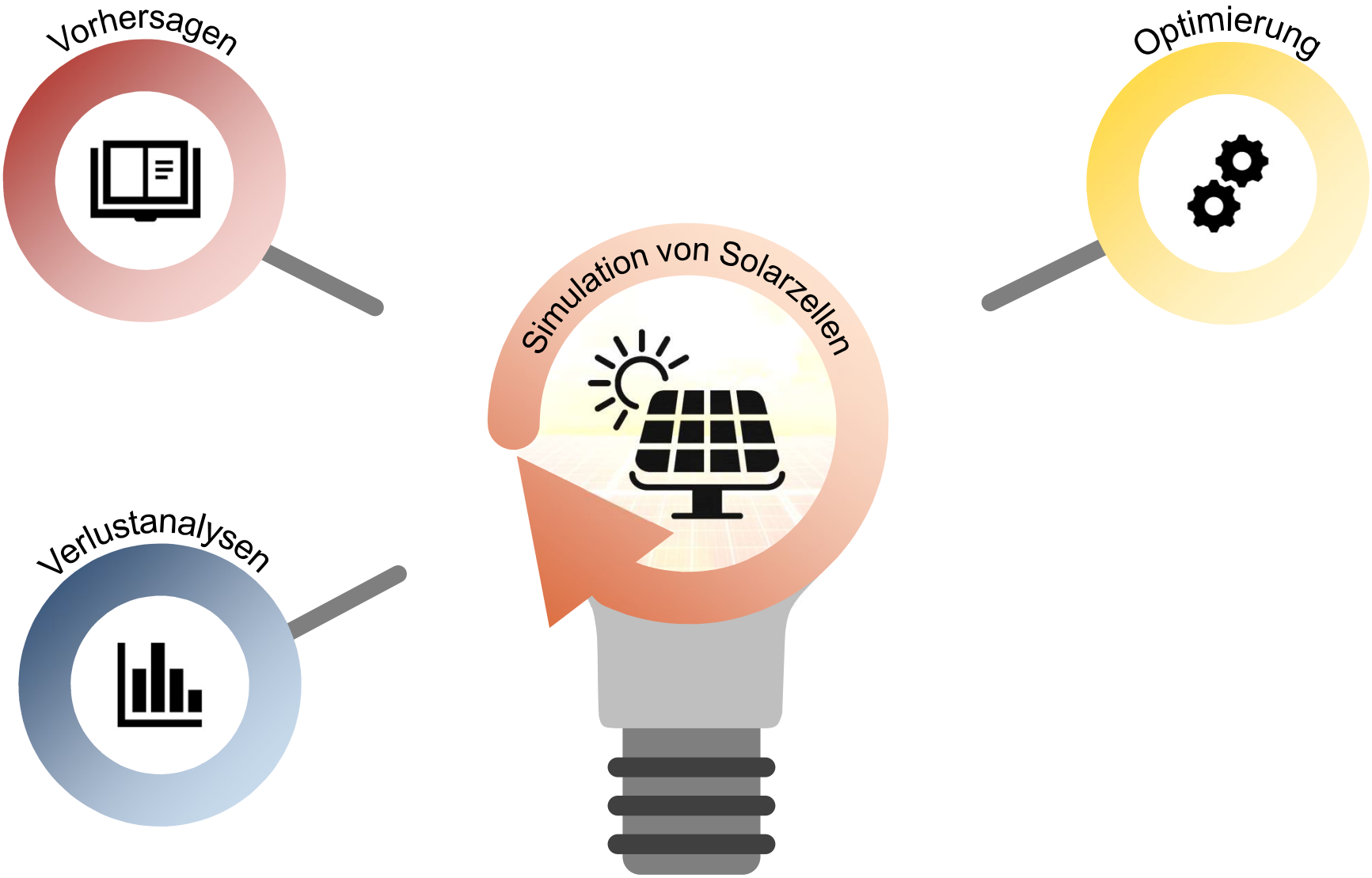

Elektrik
Geometrie
Optisches Modell
Halbleiterphysik

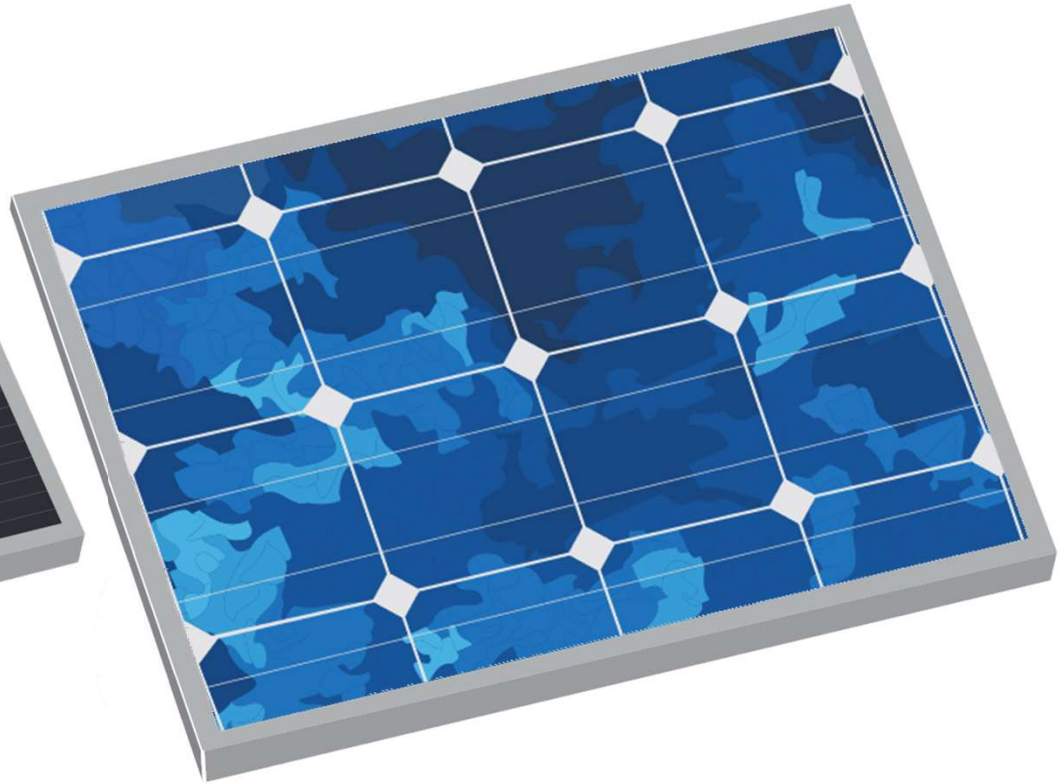

Simulation von Solarzellen
Verlustanalysen


Wirkungsgrad / %
35
30
25
20
15
10
Rekombination
Optik
Geometrie
Elektrik
Shockley-Queisser-Grenze
Rekombination
Materialebene
Reflektion
Absorption in Verkapselung
Absorption in AZO
Absorption in iZnO
Absorption in CdS
unvollständige Absorption
Zellebene
Randentschichtung
Verschaltungsfläche
Modulgeometrie
lokaler MPP-Mismatch
ohmscher Verlust in AZO
ohmscher Verlust in Moly
ohscher Verlust in Verschaltung
Kurzschluss über P1
Kurzschluss über P3
Modulebene

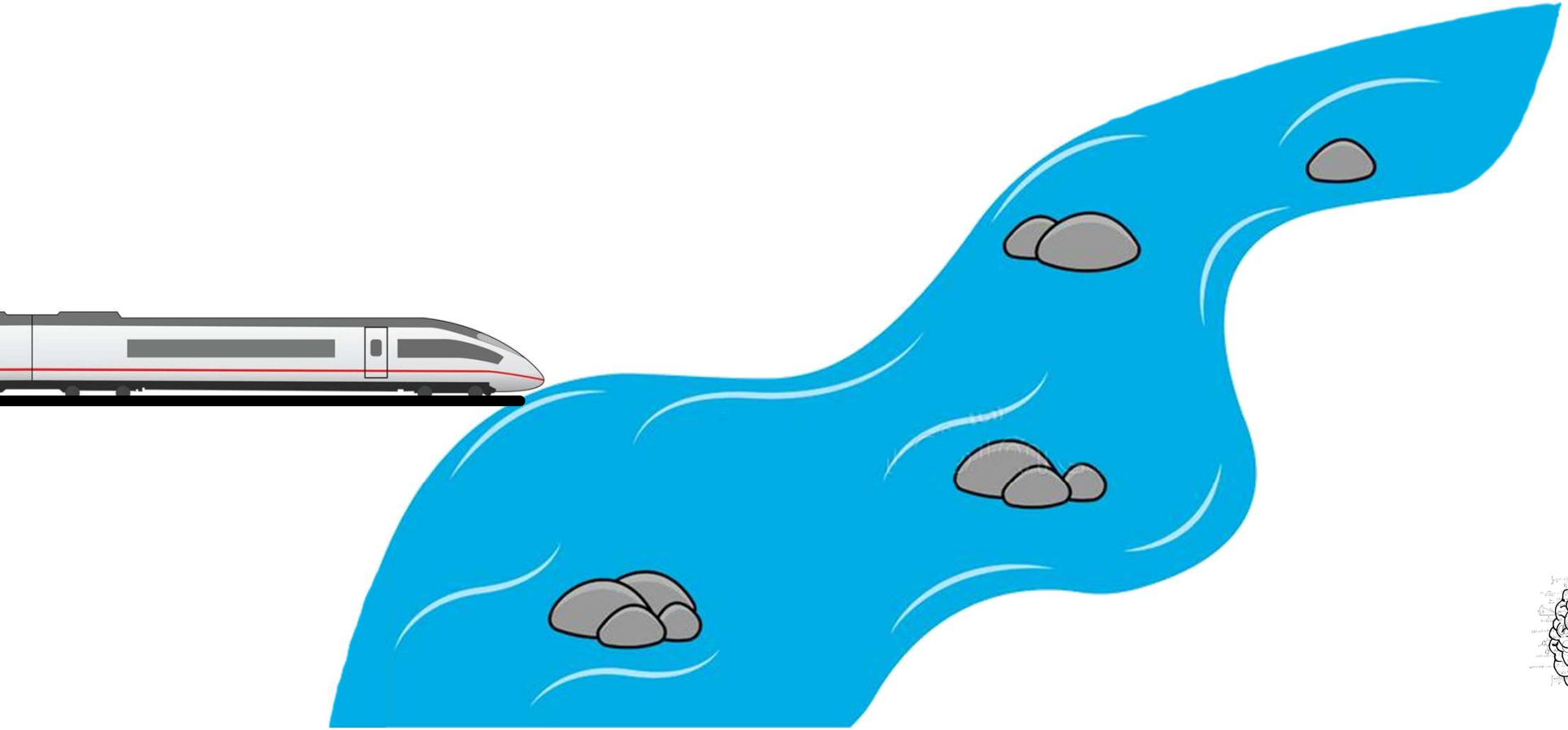

Vorhersagen
Simulation von Solarzellen
Verlustanalysen

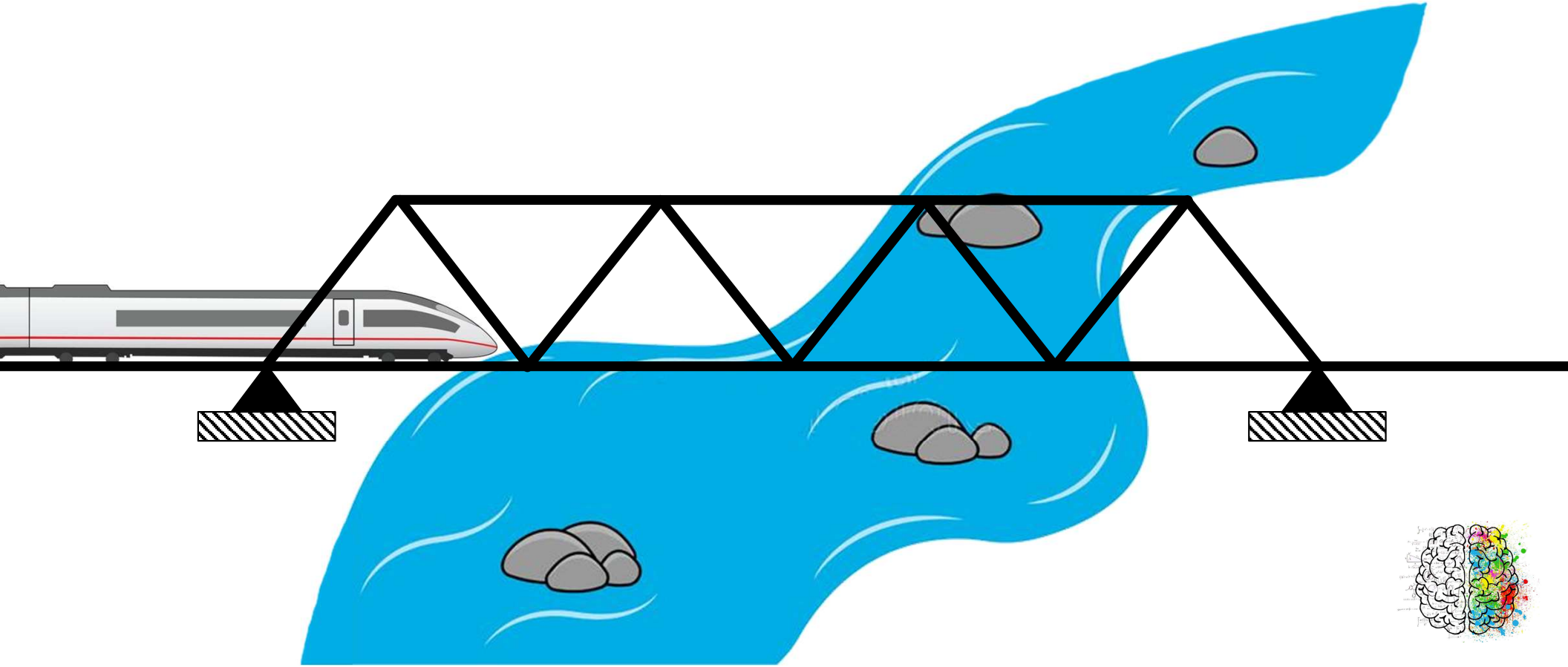

Leistung / W
Tageszeit / h
Shockley-Queisser (Temperatur, Beleuchtung)
Materialebene
Zellebene
Modulebene
Halbleiter-Verluste:
Rekombination
Optische Verluste:
Reflektion
Absorption in Verkapslung
Absorption in AZO
Absorption in iZnO
Absorption in CdS
unvollständige Absorption
Geometrische Verluste:
Randentschichtung
Verschaltungsfläche
Elektrische Verluste:
lokaler MPP-Mismatch
ohmscher Verlust in AZO
ohmscher Verlust in Moly
ohmscher Verlust in Verschaltung
Kurzschluss über P1
Kurzschluss über P3
Ertrag:
simuliert
gemessen

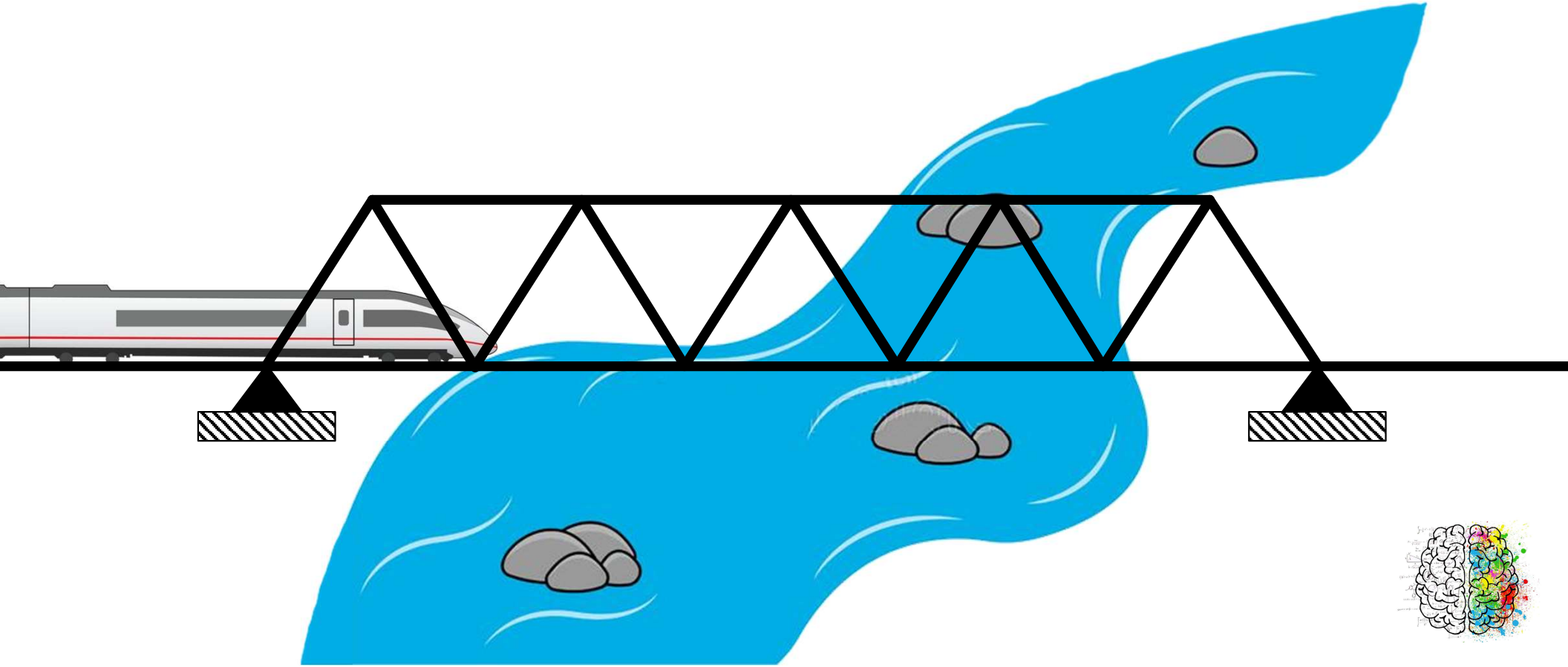

Vorhersagen
Optimierung
Simulation von Solarzellen
Verlustanalysen



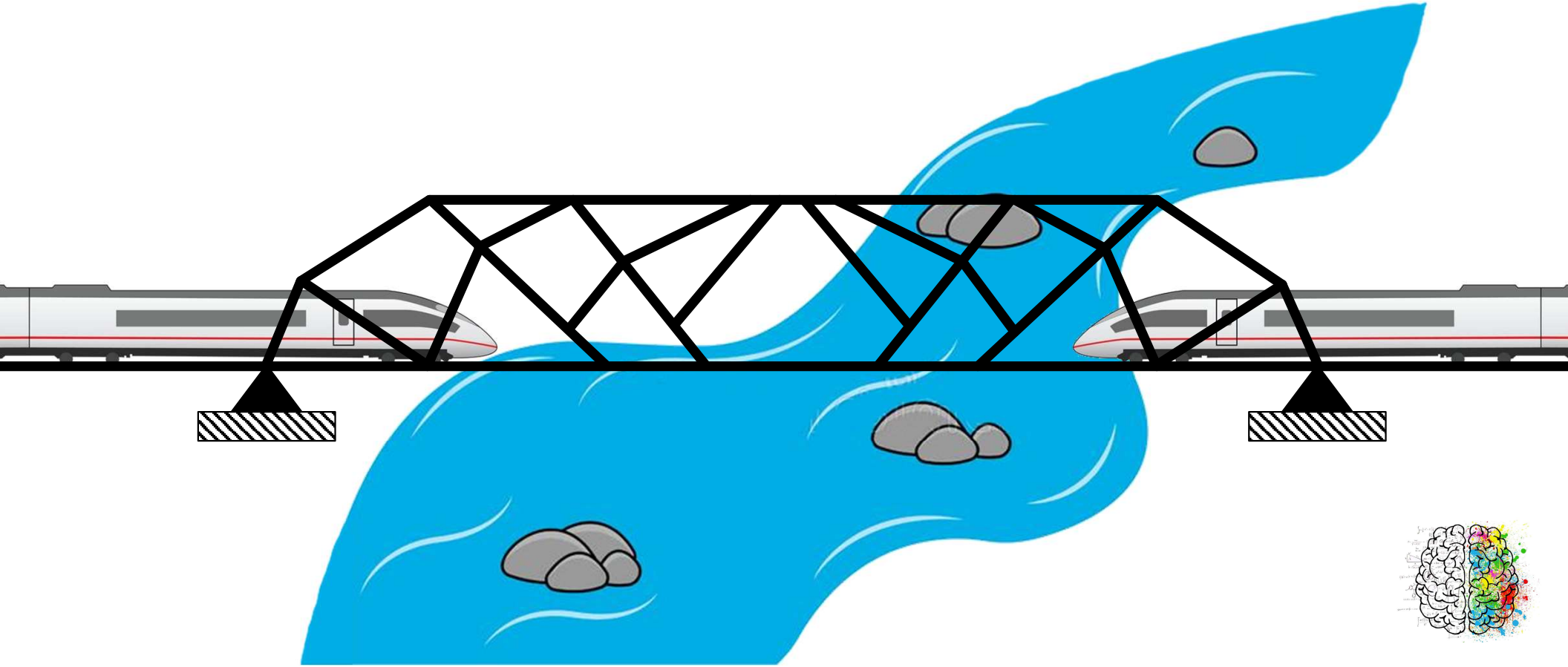
→ Topologie-Optimierung

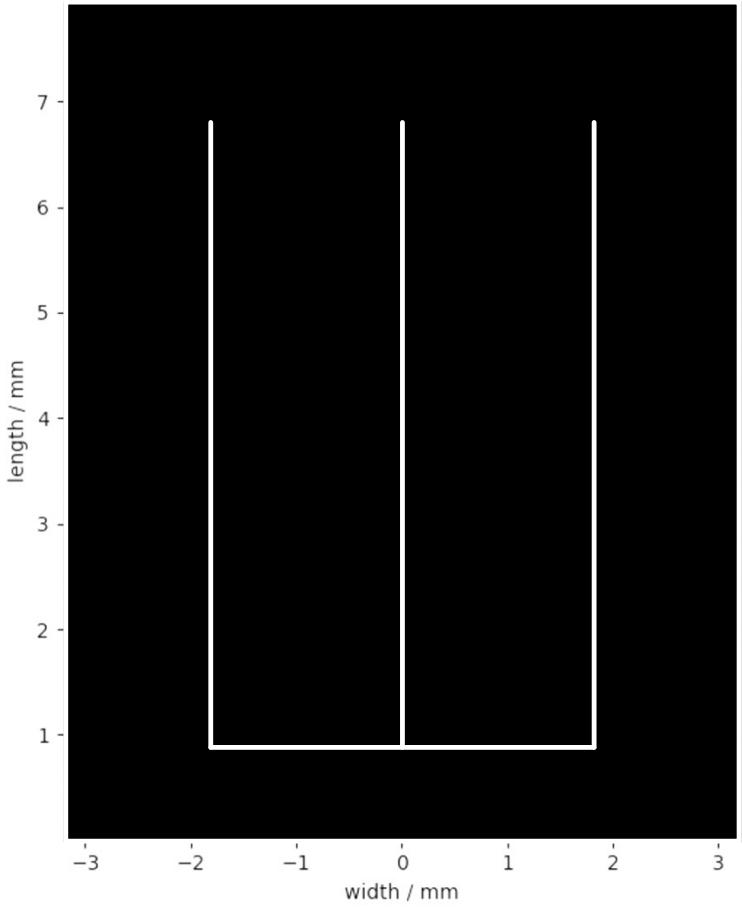


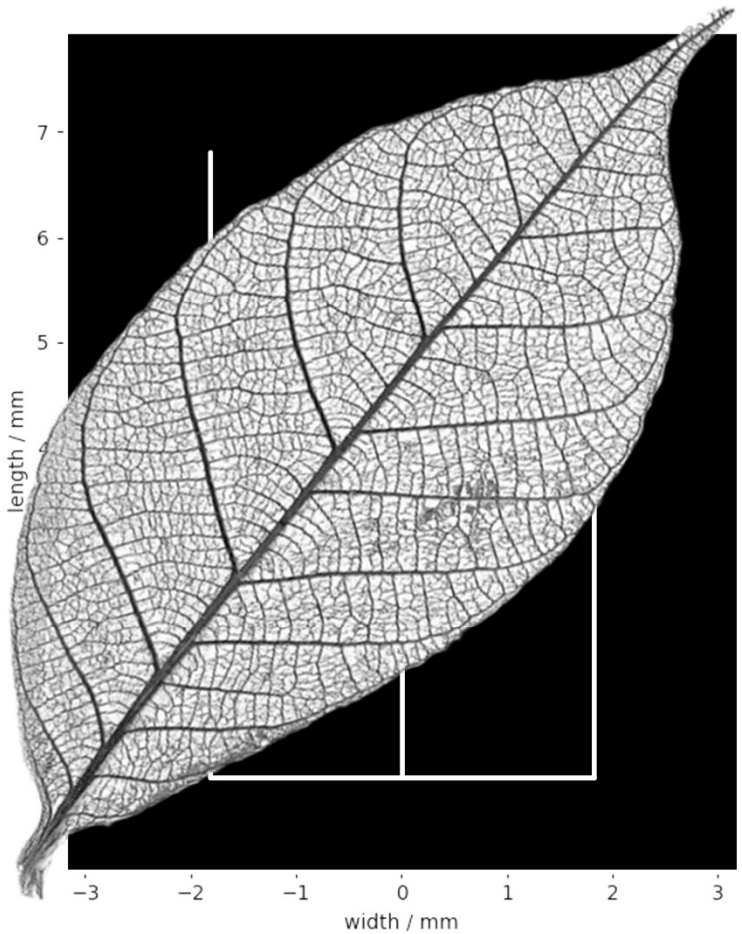


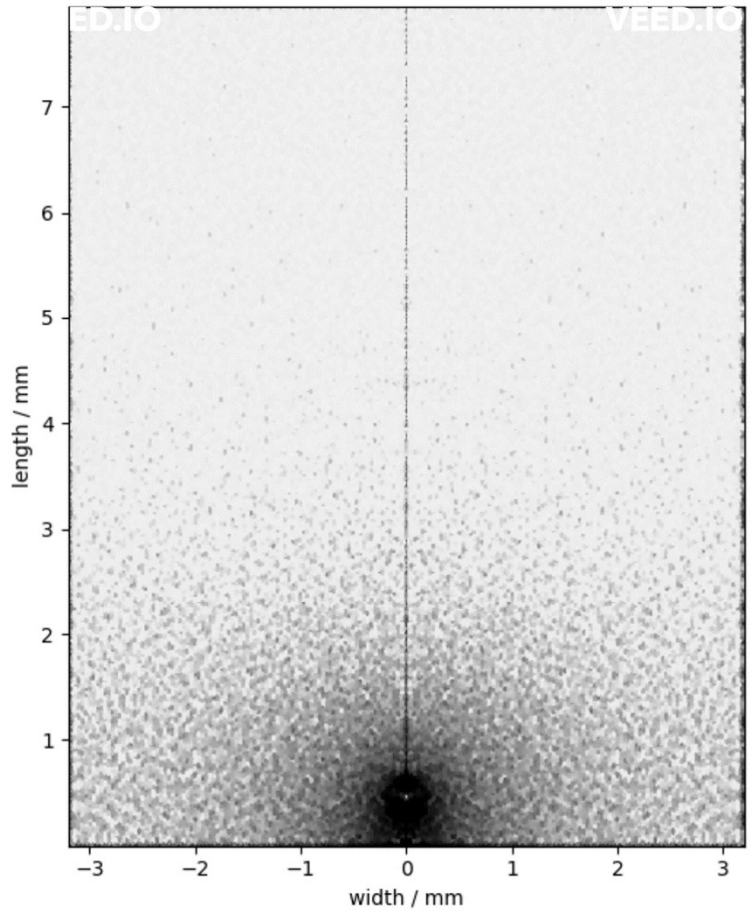


Topologie-Optimierung




7
6
5
4
3
2
1
length / mm
−3
−2
−1
0
1
2
3
width / mm


length / mm
width / mm
7
6
5
4
−3
−2
−1
0
1
2
3

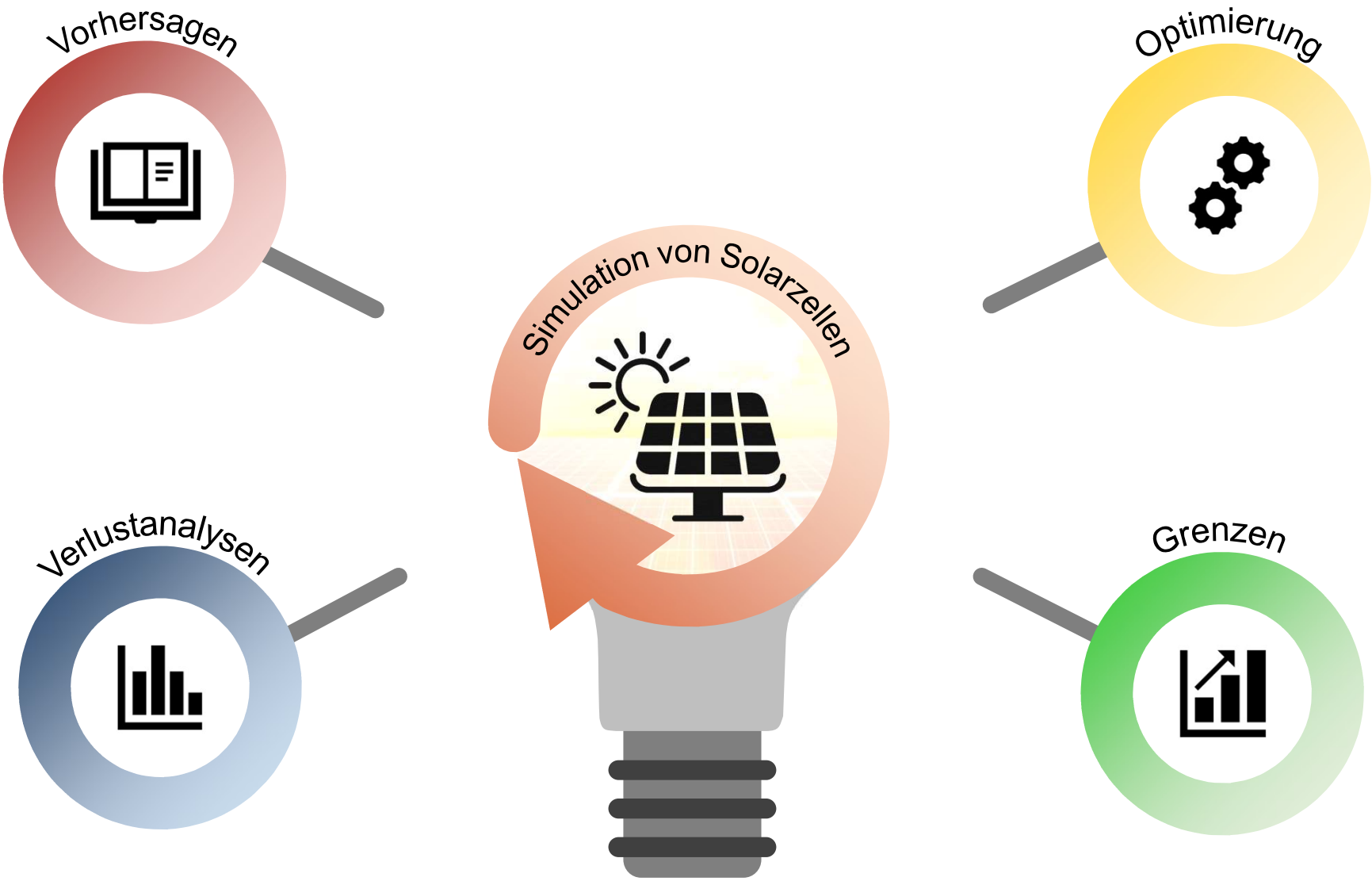

length / mm
width / mm
7
6
5
4
3
2
1
−3
−2
−1
0
1
2
3

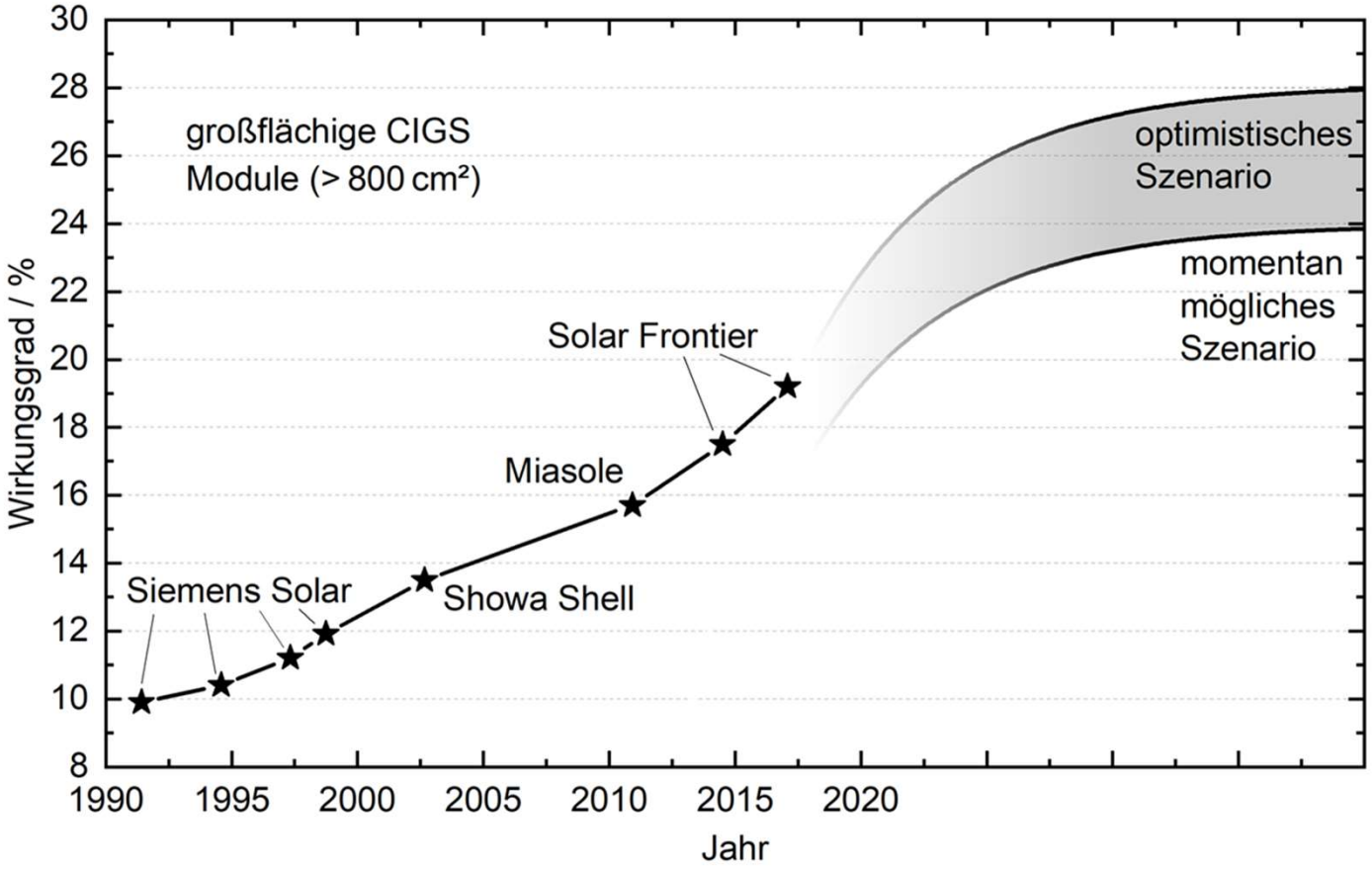
Effizienz:

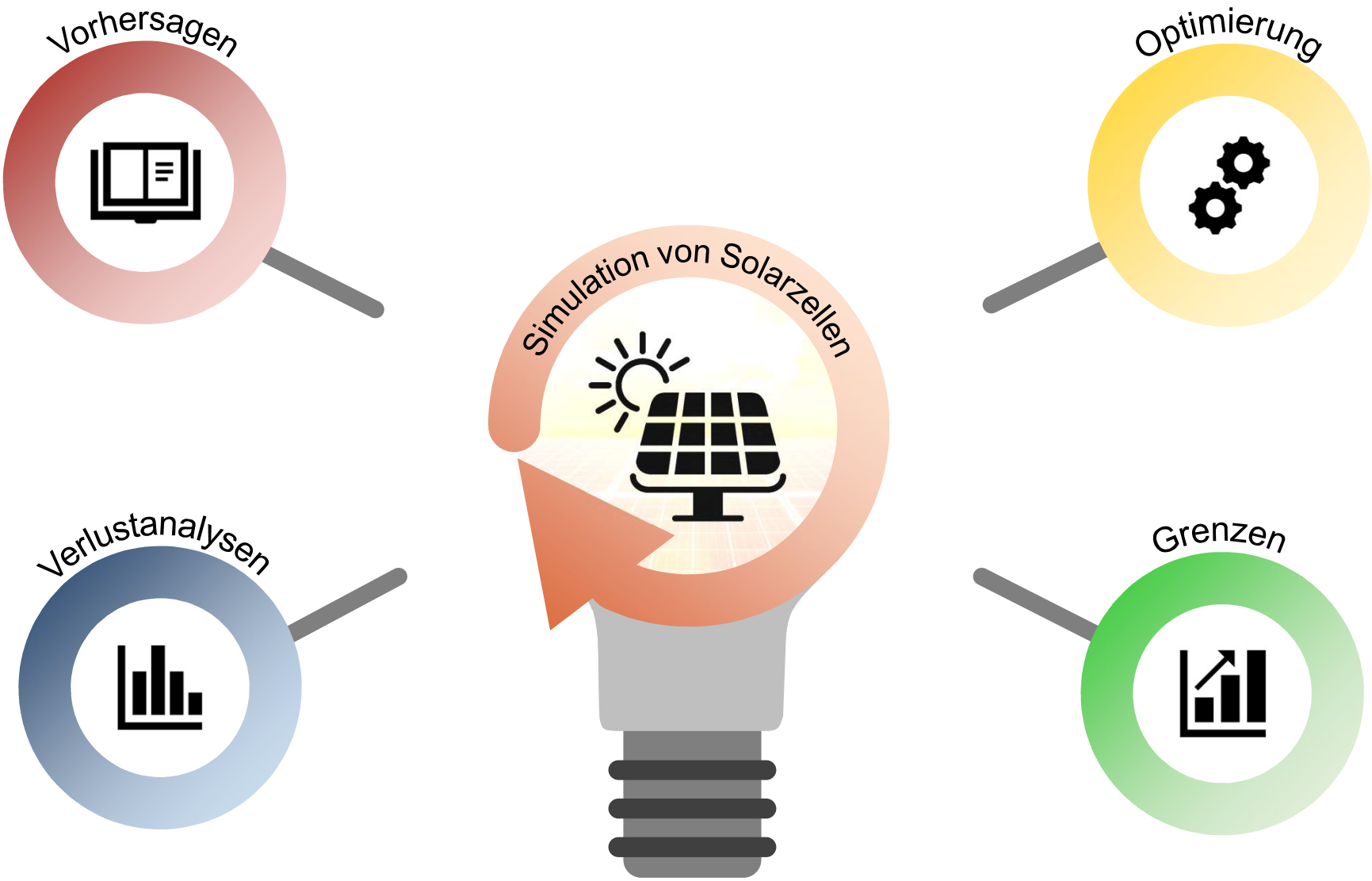
+1%

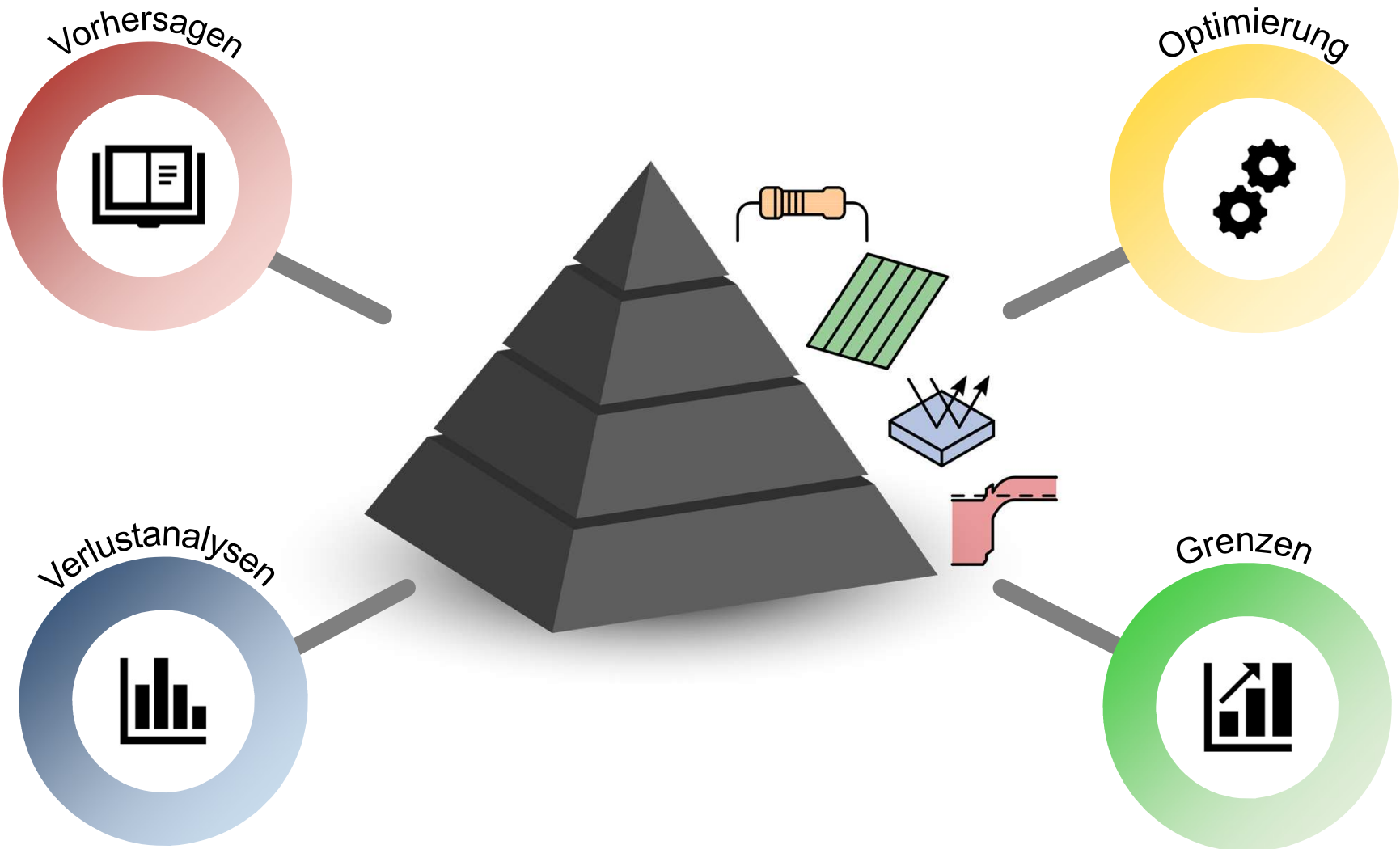
Material:

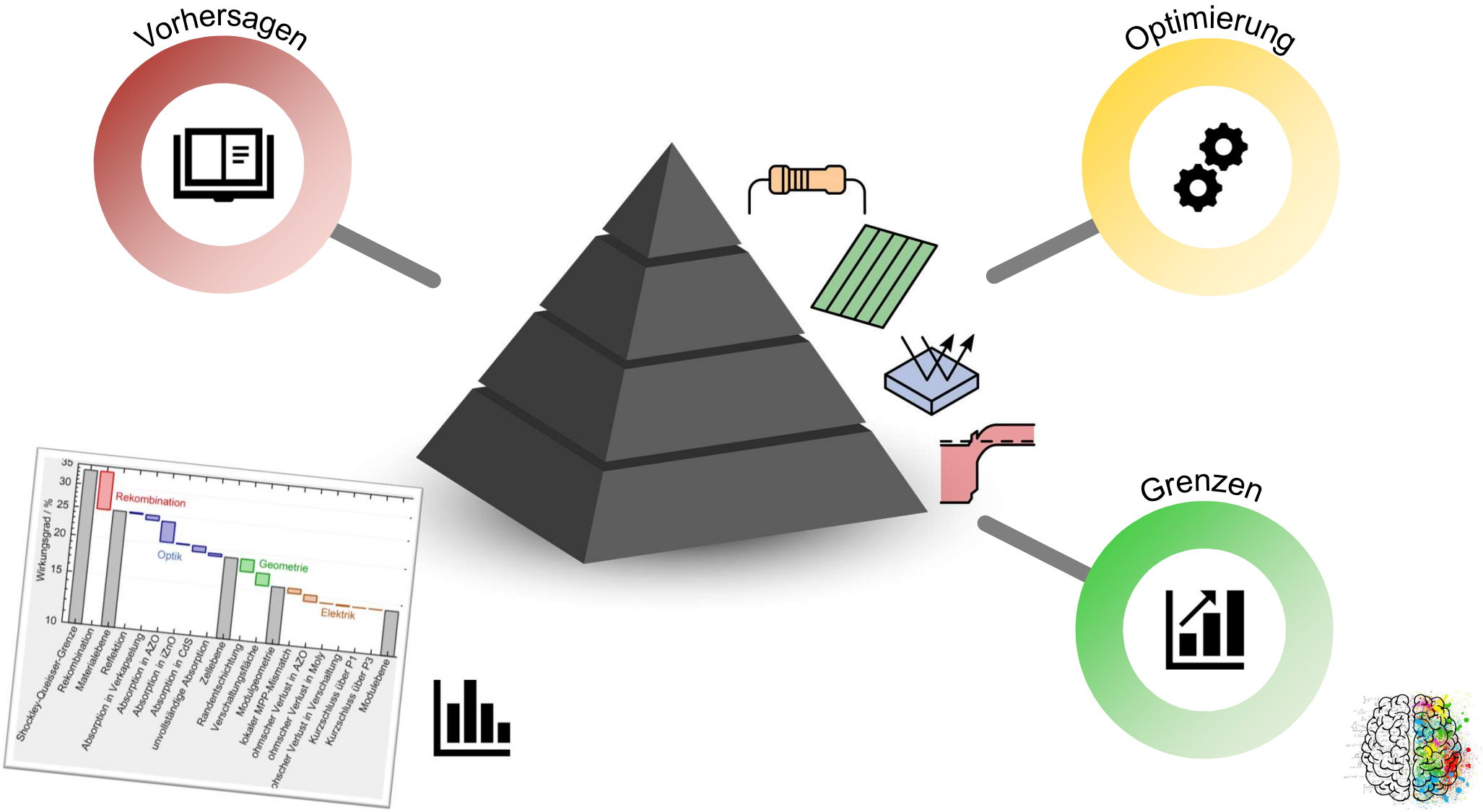
-50%

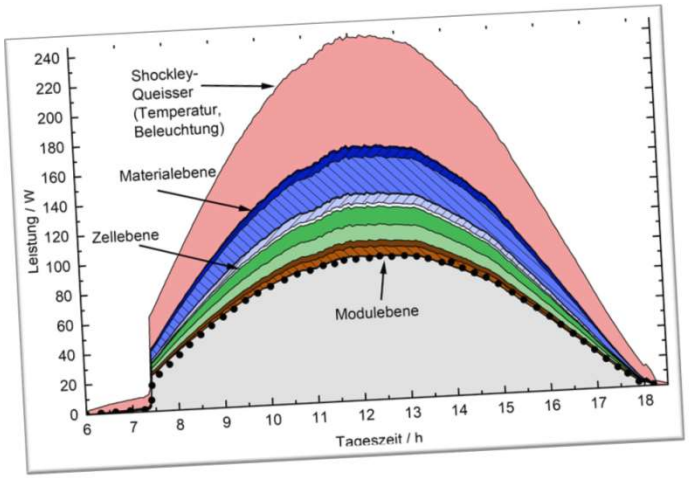

Vorhersagen
Optimierung
Simulation von Solarzellen
Verlustanalysen
Grenzen

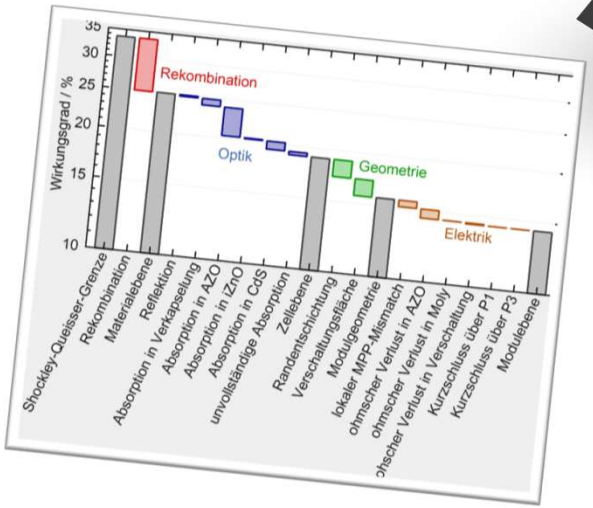

großflächige CIGS
Module (> 800 cm²)
optimistisches
Szenario
momentan
mögliches
Szenario
Solar Frontier
Miasole
Showa Shell
Siemens Solar
Wirkungsgrad / %
Jahr
30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
1990
1995
2000
2005
2010
2015
2020

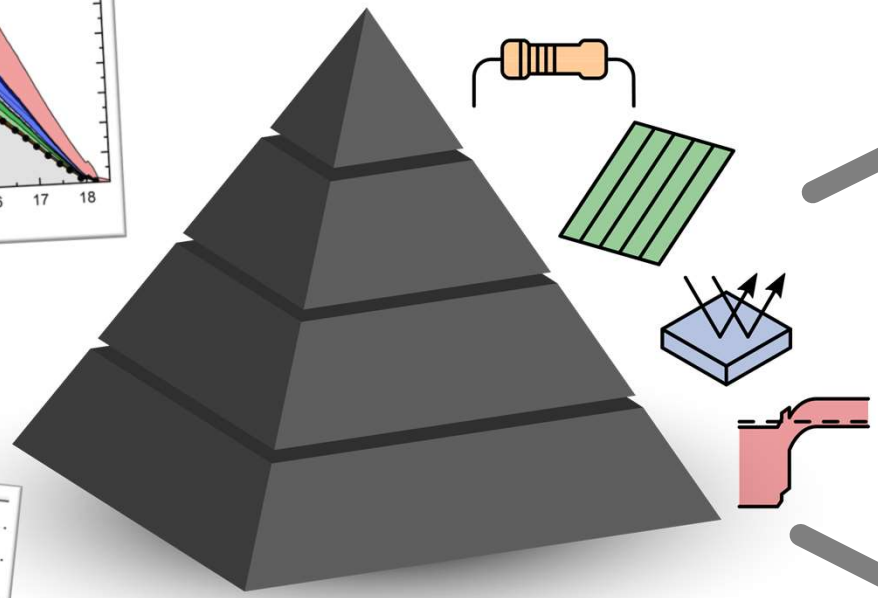

Vorhersagen
Optimierung
Simulation von Solarzellen
Verlustanalysen
Grenzen

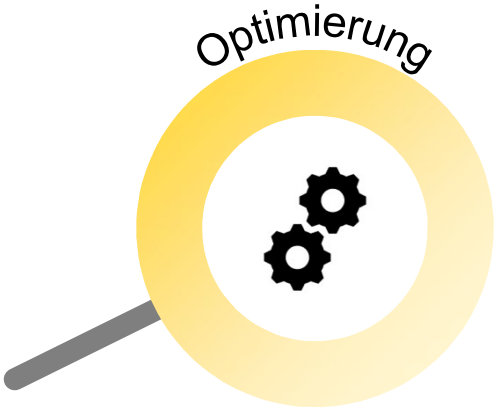

Vorhersagen
Optimierung
Verlustanalysen
Grenzen

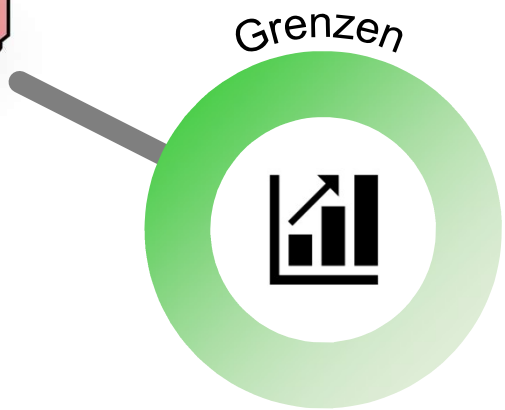

Vorhersagen
Optimierung
Grenzen
Wirkungsgrad / %
35
30
25
20
15
10
Rekombination
Optik
Geometrie
Elektrik
Shockley-Queisser-Grenze
Rekombination
Materialebene
Reflektion
Absorption in Verkapselung
Absorption in AZO
Absorption in iZnO
Absorption in CdS
unvollständige Absorption
Zellebene
Randentschichtung
Verschaltungsfläche
Modulgeometrie
lokaler MPP-Mismatch
ohmscher Verlust in AZO
ohmscher Verlust in Moly
ohmscher Verlust in Verschaltung
Kurzschluss über P1
Kurzschluss über P3
Modulebene

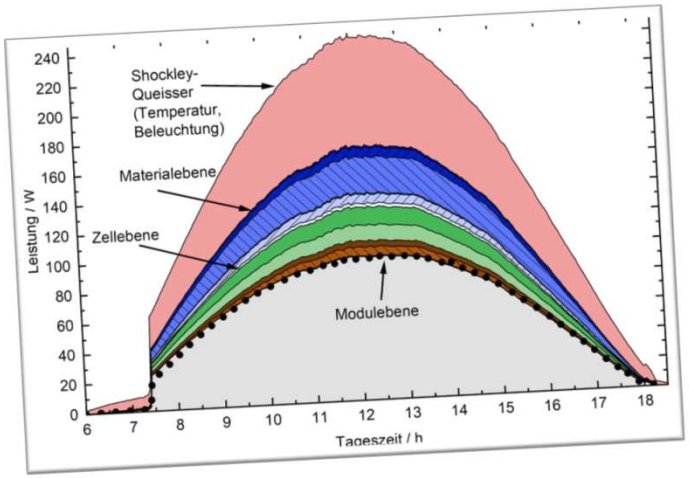

Shockley-Queisser (Temperatur, Beleuchtung)
Materialebene
Zellebene
Modulebene
Leistung / W
Tageszeit / h

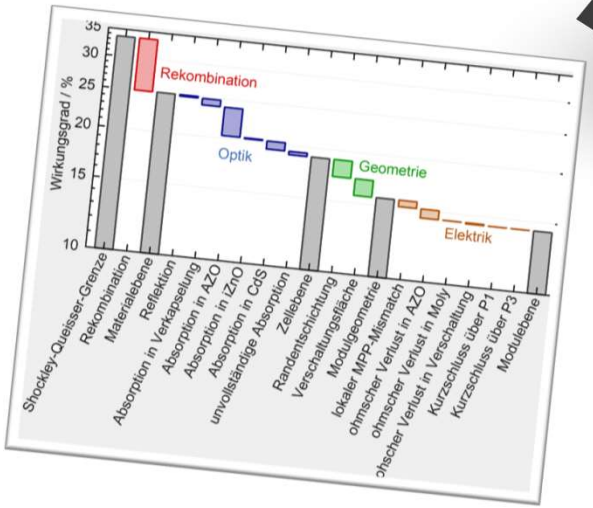

Rekombination
Optik
Geometrie
Elektrik
Wirkungsgrad / %
Shockley-Queisser-Grenze
Rekombination
Materialebene
Reflektion
Absorption in Verkapselung
Absorption in AZO
Absorption in iZnO
Absorption in CdS
unvollständige Absorption
Zellebene
Randentschichtung
Verschaltungsfläche
Modulgeometrie
lokaler MPP-Mismatch
ohmscher Verlust in AZO
ohmscher Verlust in Moly
ohmscher Verlust in Verschaltung
Kurzschluss über P1
Kurzschluss über P3
Modulebene

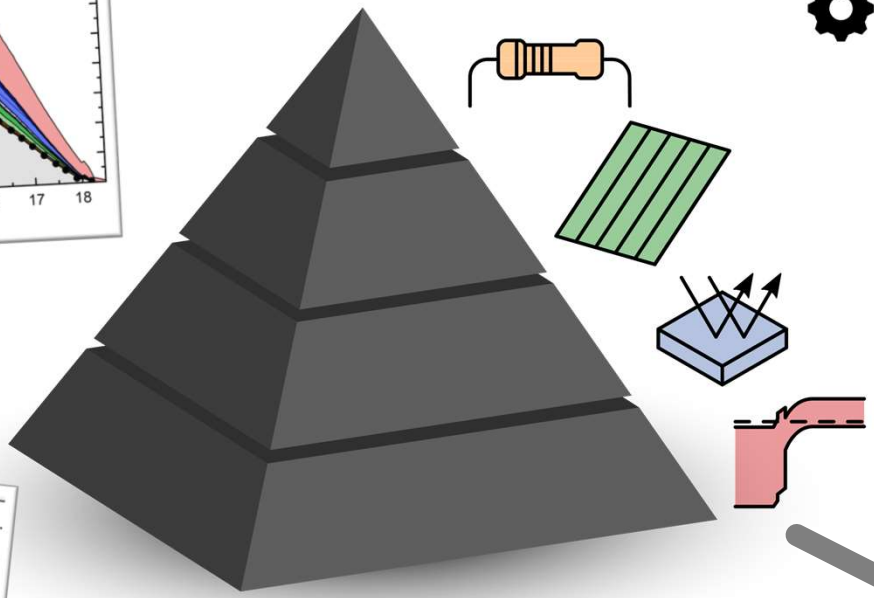


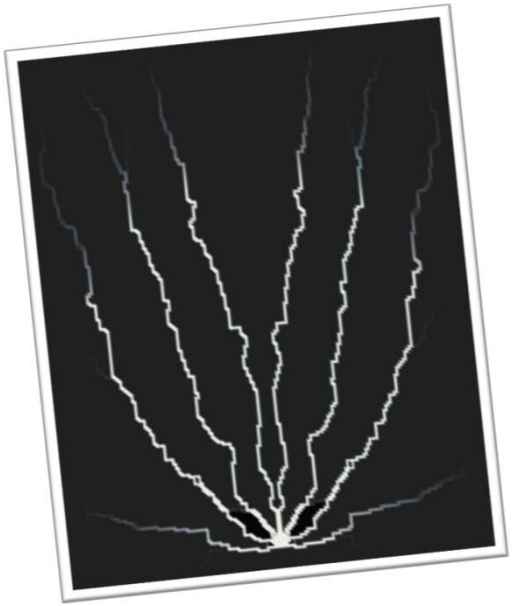

Optimierung

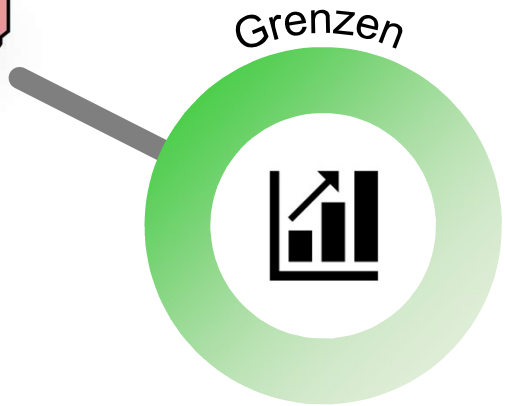

Grenzen

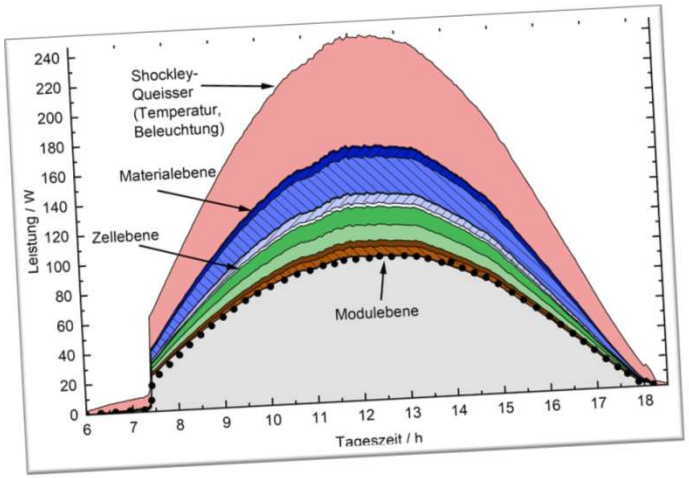

Shockley-Queisser (Temperatur, Beleuchtung)
Materialebene
Zellebene
Modulebene
Leistung / W
Tageszeit / h

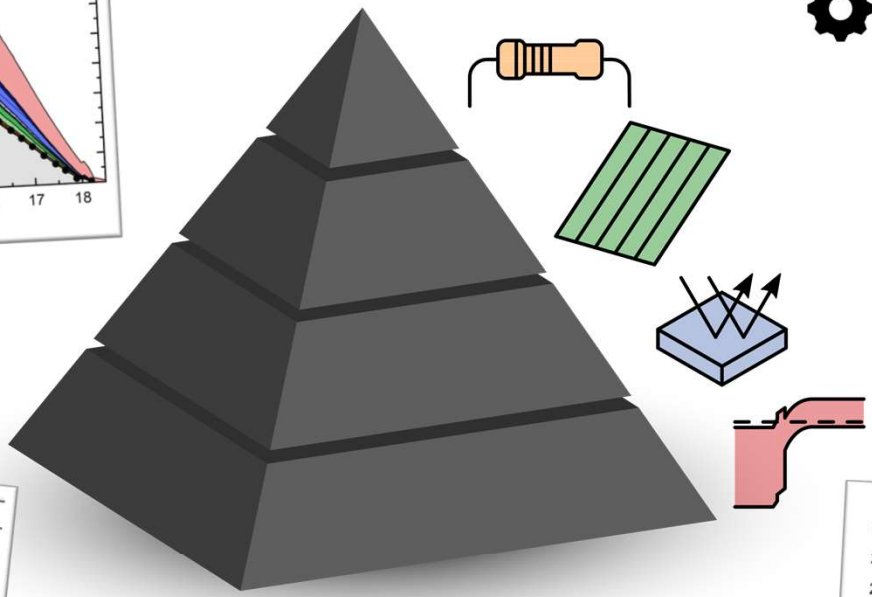

Rekombination
Optik
Geometrie
Elektrik
Wirkungsgrad / %
Shockley-Queisser-Grenze
Rekombination
Materialebene
Reflektion
Absorption in Verkapselung
Absorption in AZO
Absorption in iZnO
Absorption in CdS
unvollständige Absorption
Zellebene
Randentschichtung
Verschaltungsfläche
Modulgeometrie
lokaler MPP-Mismatch
ohmscher Verlust in AZO
ohmscher Verlust in Moly
ohmscher Verlust in Verschaltung
Kurzschluss über P1
Kurzschluss über P3
Modulebene

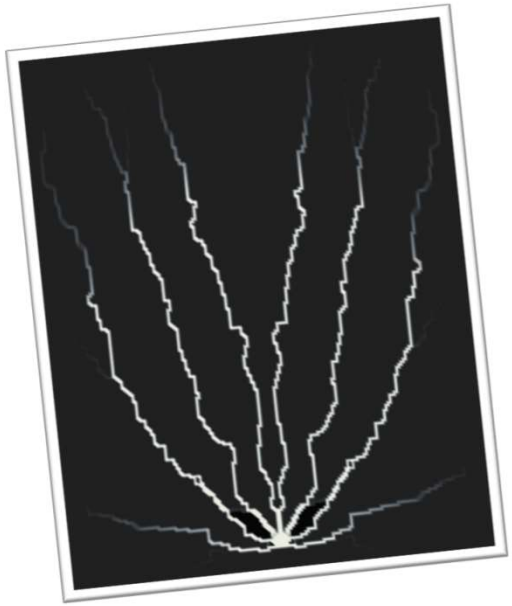


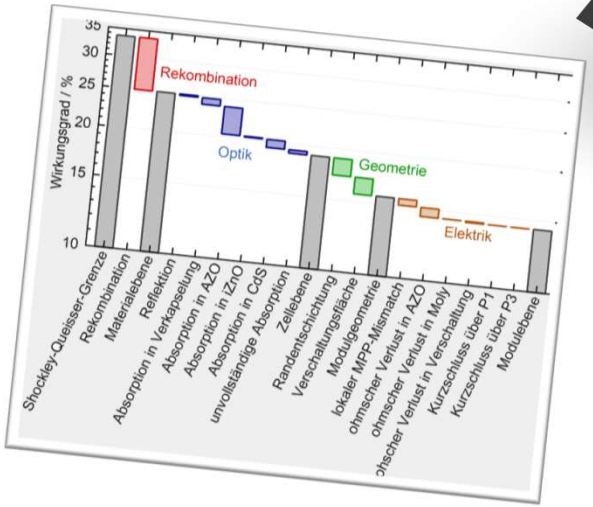


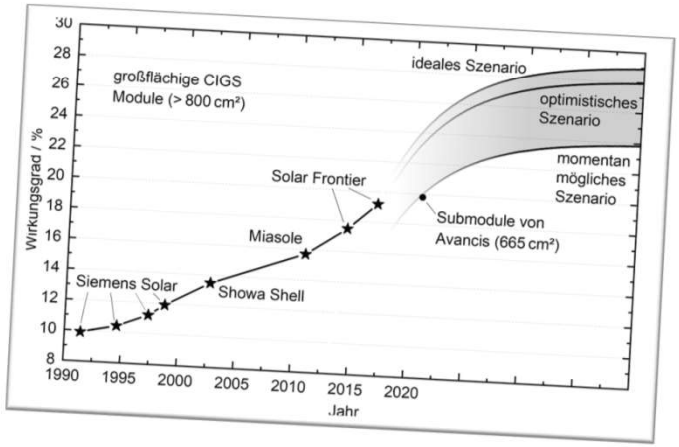

Grenzen


Shockley-Queisser (Temperatur, Beleuchtung)
Materialebene
Zellebene
Modulebene
Leistung / W
Tageszeit / h



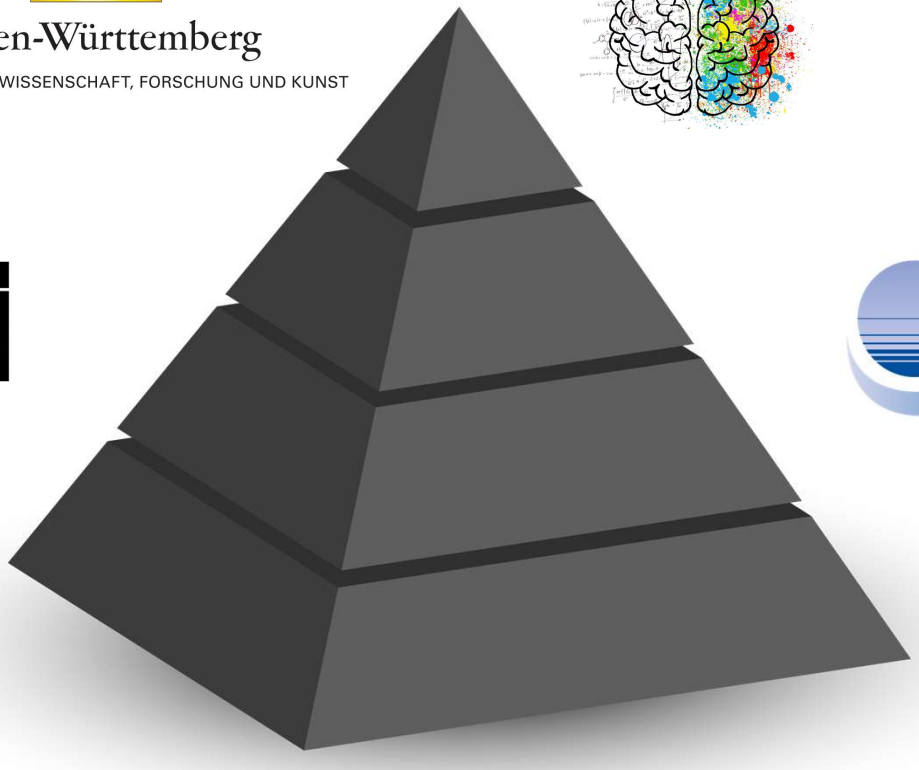



Rekombination
Optik
Geometrie
Elektrik
Wirkungsgrad / %
Shockley-Queisser-Grenze
Rekombination
Materialebene
Reflektion
Absorption in Verkapselung
Absorption in AZO
Absorption in iZnO
Absorption in CdS
unvollständige Absorption
Zellebene
Randentschichtung
Verschaltungsfläche
Modulgeometrie
lokaler MPP-Mismatch
ohmscher Verlust in AZO
ohmscher Verlust in Moly
ohmscher Verlust in Verschaltung
Kurzschluss über P1
Kurzschluss über P3
Modulebene


großflächige CIGS Module (> 800 cm²)
ideales Szenario
optimistisches Szenario
momentan mögliches Szenario
Solar Frontier
Miasole
Showa Shell
Siemens Solar
Submodule von Avancis (665 cm²)
Wirkungsgrad / %
Jahr

Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST



LTi

ZSW

KIT

Karlsruher Institut für Technologie

Studienstiftung des deutschen Volkes

KSOP

Karlsruhe School of Optics & Photonics

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages