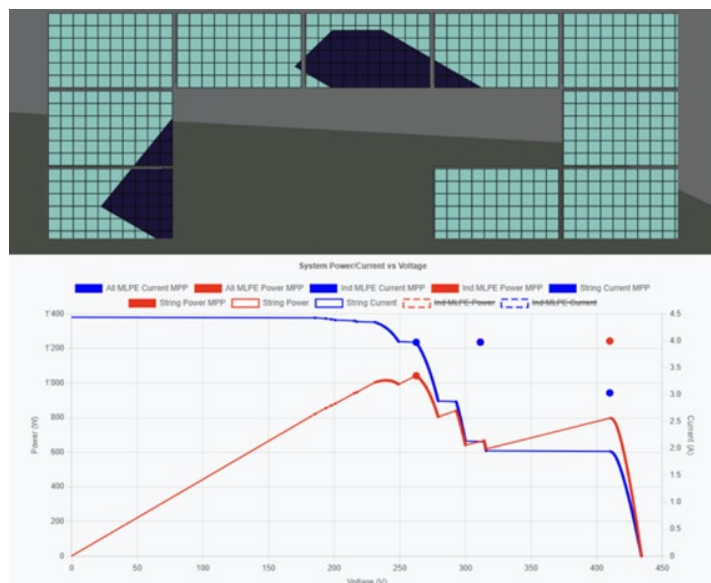


WebPVShade



Vertragsnummer.: SH/8100380-02-01-46

Subventionsempfänger: ZHAW / IEFE

Dauer: 01.07.2023 – 31.10.2025

Ansprechpartner Subventionsgeber: Dr. Wieland Hintz

Ansprechpartner Subventionsempfänger: Prof. Dr. Franz Baumgartner

Datum: 28. Oktober 2025

Autoren: Markus Klenk, Josias Ribl, Franz Baumgartner

Zusammenfassung Ausgangslage und Zielerreichung

Die technische Ausgangslage, dass sich der Systemertrag von PV-Anlagen durch Verschattung einzelner Module stark reduzieren kann, ist für Experten, aber auch für technisch weniger versierte Nutzer, direkt einleuchtend. Geräte, welche darauf abzielen Verschattungsverluste zu minimieren, sind daher gefragt und das Marktvolumen von sogenannten Optimizern, oder Module Level Power Electronics (MLPE), nahm international und auch in der Schweiz immer weiter zu.

Die hohe Akzeptanz derartiger Geräte ist auch auf den starken positiven Effekt zurückzuführen, der ihnen im Allgemeinen zugeschrieben wird. Dies löste die Erwartung aus die real erzielbare Verlustminimierung genau zu quantifizieren und führte zu etwa einem Dutzend an der ZHAW durchgeführten geförderten nationalen Projekten und ZHAW-internen Studentenarbeiten (Projekt-, Bachelor- und Masterarbeiten) in der Gruppe von Prof. Dr. Baumgartner. Diese Projekte und Arbeiten beinhalteten einerseits die Untersuchung der Hardware-Komponenten (MLPE), andererseits die Zusammenhänge zwischen Verschattung, Performance und Geräteverhalten, auch im Vergleich zum Stringinverter (SINV). Zudem wurden gemischte Systeme mit MLPE an nur ausgewählten Modulen (Independent MLPE – IndMLPE) aufgenommen. Im Laufe dieser Arbeiten wurden in einem Vorgängerprojekt auch Software-Tools entwickelt, um die entsprechenden Erträge und Verluste zu simulieren und darzustellen. Diese Ergebnisse deuteten darauf hin, dass die Minimierung der Ertragsverluste durch MLPE in typischen Verschattungsfällen zumindest deutlich geringer ausfällt als von MLPE-Herstellern, aber auch von PV-Planern weithin angenommen.

Das Interesse an den Ergebnissen, die national und international veröffentlicht wurden, nahm stark zu. In der Folge wurde beschlossen die bereits vorhandenen Software-Tools weiterzuentwickeln und auszubauen. Im Kern waren dies eine in Matlab aufgesetzte Simulationssoftware «PVShade» zur Simulation als Expertensystem und ein webbasiertes interaktives Tool zur Darstellung typischer Verschattungsszenarien «WebPVShade». Dieses stellt die Ergebnisse des «PVShade»-Expertensystems in visualisierter Form auf einer öffentlich zugänglichen Plattform dar, auf welcher der Nutzer die berechneten Ergebnisse im Detail nachvollziehen kann.

Diese Weiterentwicklung erfolgte im vorliegenden Projekt «WebPVShade» welches von EnergieSchweiz gefördert wurde. Dabei wurden aus technischer Sicht im Wesentlichen zwei Ziele verfolgt. Einerseits sollten insbesondere komplexere Szenarien der Verschattung von PV-Generatoren erfasst werden können, da der Nutzen der Optimizer erst in diesen Fällen voll zum Tragen kommt. Hierbei wurde ursprünglich angestrebt, dass am Vertrieb von Optimizern interessierte Firmen gegen Bezahlung Szenarien darstellen können, welche den Nutzen ihrer Geräte belegen. Andererseits sollte die webbasierte Plattform ausgebaut werden, um die öffentliche Darstellung der erzielten Ergebnisse zu unterstützen.

Im Laufe des Projektes stellte sich immer deutlicher heraus, dass die Verlustminimierung der Optimizer auch in komplexeren Verschattungsfällen beschränkt bleibt. Dies und die allgemeine Finanzsituation der Branche, das Erlahmen der PV-Inverter Verkäufe nach dem Rückgang der Strompreisspitzen und der Preiskampf asiatischer Anbieter, erschwerte die vorgesehene Beteiligung von Industriepartnern. Die eingeplanten Beiträge wurden durch ZHAW-interne Mittel ersetzt, sodass das Projekt fortgesetzt werden konnte. Die im Projektplan vorgesehene Realisierung von Kundenaufträgen wurde durch die Umsetzung selbstdefinierter komplexerer Verschattungsszenarien ersetzt. Ein wesentlicher Teil der

Arbeiten im Projekt wurde auch durch Einbindung von Studenten in Bachelor- und Projektarbeiten, sowie durch IT-Studenten mit entsprechender Expertise auf Honorarbasis unterstützt.

Es zeigte sich, dass das Matlab-Tool bei erhöhter Komplexität zunehmend an seine Grenzen stiess und überarbeitet werden musste. Hierbei wurde aufgrund der Erfahrungen und des grundlegenden Codes eine deutlich verbesserte, professionellere und wesentlich schnellere Version auf der Basis von Java erstellt, was auch zukünftigen Entwicklern einen besseren Zugang ermöglicht.

Es muss angemerkt werden, dass aktuell keine kommerziellen Software-Tools zur PV-Planung auf die individuellen Arbeitspunkte der einzelnen Optimizer im System zurückgreifen. Im Forschungsbereich beschäftigen sich das Fraunhofer ISE und die TU Delft mit der Thematik und haben hierzu Ergebnisse veröffentlicht, wie im IEA PVPS T13-27 2024 gezeigt wird.

Insgesamt konnten die gesetzten technischen Ziele voll erreicht werden. Über die «WebPVshade»-Webseite kann die Performance verschatteter PV-Systeme den Anwender in der Praxis demonstriert werden. Auch wenn eine allgemeingültige Darstellung des berechneten MLPE-Mehrertrags auf der Basis vorgegebener repräsentativer Beispiele immer eingeschränkt bleiben wird, kann durch den «Shading-Index» als Masszahl für die Verschattung eines PV-Systems, dennoch eine annähernd systematische Darstellung durchgeführt werden. Dieser Zugang auf der Webseite folgt der Faustformel, hoher «Shading-Index», mehr Nutzen durch Optimizer Systeme. Das neue «PVShade»-Tool ermöglicht es auch sehr komplexe Szenarien leicht umsetzbar aufzubauen und erlaubt eine schnelle Simulation von Jahreserträgen in weniger als 10 Minuten, was einer Steigerung im Vergleich zum alten Matlab-Programm um den Faktor 10- 20 entspricht.

Vorschau auf die wesentlichen Erkenntnisse

Die Ergebnisse zeigen einerseits, dass die MLPE-Systeme bereits bei moderater Verschattung einen leicht höheren Ertrag erzielen können und auch, dass deren Nutzen mit zunehmendem Teilverschattungsgrad zunimmt. Andererseits bleibt auch bei sehr starker Teilverschattung der Nutzen weit hinter dem üblicherweise erwarteten Effekt zurück und liegt bei den hier präsentierten Fällen im mittleren einstelligen Prozentbereich. Mit IndMLPE-Systemen können recht ähnliche Effekte wie mit durchgängig installierten MLPE erzielt werden, wobei es einleuchtend ist, dass insbesondere die Anzahl und Lage der MLPE in diesen Systemen eine grosse Rolle spielt.

Das webbasierte Ausgabetool «WebPVShade» wurde neu aufgesetzt und bietet eine grosse Auswahl zur Darstellung detaillierter Performance-Ergebnisse für jeden Simulationszeitpunkt, inklusive der Modulverschattungen mit Auflösung auf Zellenebene und den entsprechenden Modul-Kennlinien, was vorher nicht möglich war. Das grundlegende Problem mit der Darstellung allgemeiner Ergebnisse durch beispielhaft ausgewählte Szenarien bleibt zwangsläufig bestehen und die Übersichtlichkeit wird auch nicht durch eine grössere Anzahl von zur Verfügung gestellten Optionen verbessert. Dennoch bietet nun bereits eine als Default hinterlegte Auswahl von Szenarien mit jeweils gleichem Strangaufbau durch die Variation des «Shading-Index» eine annähernd systematische Übersicht bei zunehmender Teilverschattung. Spezifische Szenarien können jederzeit im «PVShade» simuliert und hinzugefügt werden. Die schnelle Berechnung lässt nun zukünftig sogar an einen interaktiven Aufbau durch den Nutzer des Webtools denken. Selbst wenn der Aufbau

prinzipiell einfach ist, müssten hier dennoch Ressourcen in das Nutzer-Interface investiert werden. Insgesamt sind auch die angestrebten Ziele des «WebPVShade» voll erreicht worden.

Potenziell sind über die «PVShade»-Software zukünftig auch Untersuchungen an verschattungsresistenten Modulen möglich. Für eher klassische Ansätze ist das bereits jetzt möglich, für die aktuell im Fokus stehenden Module bei welchen die Bypassdioden «in den Zellen integriert» sind, müsste jedoch die Sperrkennlinie der Zellen berücksichtigt werden, was im Moment so nicht umgesetzt ist. Dies würde auch den Vergleich der Ansätze zur Reduktion der Teilverschattungsverluste durch MLPE und Module ermöglichen.

Take-Home-messages / Learnings aus der Projektarbeit

- MLPE führen bereits bei vergleichsweise geringer Teilverschattung zu einem leicht höheren Ertrag im Vergleich zu Systemen mit Stringinvertern. Wie erwartet nimmt der Nutzen der MLPE bei stärkerer Teilverschattung zu. Insbesondere bei grossen nur schwach oder nicht verschatteten Systemen kann der Ertrag von MLPE-Systemen durch die sich summierenden DC/DC-Geräteverluste, im Vergleich zu einem einfachen Stecker zwischen den Modulen, zu einem geringeren Ertrag als bei Stringinvertern führen.
- Der Gewinn durch MLPE im Vergleich zum Einsatz von Stringinvertern bleibt selbst bei starker Teilverschattung bei den untersuchten Szenarien im mittleren einstelligen Prozentbereich.
- Beide Software-Tools, zur Performance-Berechnung und zur Webdarstellung, erfüllen die in sie gesetzten Erwartungen. Durch die Neuaufsetzung sind zukünftig auch erweiterte Umsetzungen, wie die Untersuchung verschattungsresistenter Module, und der Vergleich dieses Ansatzes mit dem Effekt durch MLPE möglich.
- Beide Software-Tools konnten wesentlich effektiver gemacht werden. Dies wurde hauptsächlich durch den gezielten Einsatz von IT-Spezialisten im Projekt möglich, welche ihr Fachwissen im Austausch mit den erfahrenen PV-Experten voll einbringen konnten. Dies unterstreicht den Nutzen von interdisziplinär zusammengesetzten Teams.

Zusammenfassung der Ergebnisse des Subventionsprojekts

Überarbeitete finale Versionen des «PVShade»-Programms und des Webtools zur interaktiven Ausgabe («WebPVShade»)

Einführend soll aufgrund häufiger Missverständnisse hervorgehoben werden, dass das «PVShade»-Programm nie zum Ziel hatte mit Simulationstools wie «PVSyst» zu konkurrieren. Trotz aufwändiger Berechnungen werden Effekte wie beispielsweise Serienwiderstände in Strängen durch Zuleitungen oder die Reflexion an der Moduloberfläche nicht erfasst. Dies ist im Gegenteil auch gar nicht erwünscht, da die entsprechenden Ergebnisse der Teilverschattungseffekte hierdurch beeinflusst würden. Dennoch resultieren aus den Berechnungen vernünftige Simulationserträge.

Die Simulationen basieren auf publizierten Daten, z.B. den Datenblattangaben der eingesetzten Module, aus welchen die entsprechenden Kennlinien berechnet werden, aber insbesondere auch auf experimentell ermittelten Eigenschaften der Hardwarekomponenten, wie der MLPE.

Im Laufe der vorangegangenen Arbeiten und auch innerhalb dieses Projektes flossen die gewonnen Erkenntnisse in die kontinuierlich entwickelte Software ein. Eine chronologisch aufgebaute Rekapitulation der Vorgehensweise ist aus den vorhergegangenen Publikationen und Berichten möglich, würde hier aber zu Wiederholungen führen. Deshalb wird im Folgenden auf die überarbeiteten und finalen Versionen der «PVShade»- und «WebPVShade»-Tools eingegangen.

Die bis zum letzten Zwischenbericht gezeigten Ergebnisse wurden mit einem in Matlab programmierten «PVShade»-Code berechnet. Hierbei wurden vergleichsweise einfache Verschattungsszenarien umgesetzt. Dies war im Hinblick auf die Untersuchung des Nutzens von MLPE in verschatteten Systemen noch nicht zufriedenstellend, da sich deren positiver Effekt vor allem in komplexen Verschattungssituationen zeigen sollte.

Das eingesetzte Matlab-Programm kam bei der Umsetzung komplexerer Szenarien jedoch an seine Grenzen. Das Programm ist im Laufe der Zeit gewachsen, woraus sich eine Struktur ergab, die nicht geeignet war, um wechselnde und noch komplexere Szenarien zu realisieren.

So war jedes Szenario und jede Komponente fest im Programmcode verankert. Bei Variationen musste jeweils das gesamte Programm als Block gespeichert werden. Verbesserungen oder Änderungen im allgemeinen Programmablauf mussten dann wieder in allen gespeicherten Szenarien abgeändert werden, wenn man auf dem gleichen Stand bleiben wollte. Die Programmierung in Matlab, wie auch die gewachsene Struktur des Programms, führte zu umständlichen Rechenwegen mit langen Berechnungsdauern und einem schwierigen Aufbau von Verschattungsszenarien.

Um diese Themen anzugehen wurde entschieden die grundlegenden Konzepte zu übernehmen, aber die Programmstruktur in das verbreitetere Java zu übertragen, was den Code auch einfacher zugänglich für zukünftige Entwickler macht. Dabei konnte dann das gesamte Programm überarbeitet und strukturiert neu aufgebaut werden, um identifizierte Flaschenhälse und Schwächen zu adressieren. Für Berechnungen kann dabei nun teilweise auf bekannte und effiziente Hilfsmittel zurückgegriffen werden. Die Geschwindigkeit der Berechnungen wurde um einen Faktor 10-20 gesteigert. Berechnungsdauern für eine Jahresimulation liegen nun typischerweise bei ca. 10 Minuten. Nach Übertragung in das Frontend ist keine weitere Berechnung notwendig, die Daten, Verschattungskennlinien usw. können

für jeden Simulationszeitpunkt direkt sichtbar über Schieberegler abgerufen werden (siehe Abbildung 5 und ff). Weitere Einzelheiten zu den Änderungen im neuen Programmcode finden sich in Anhang 1.

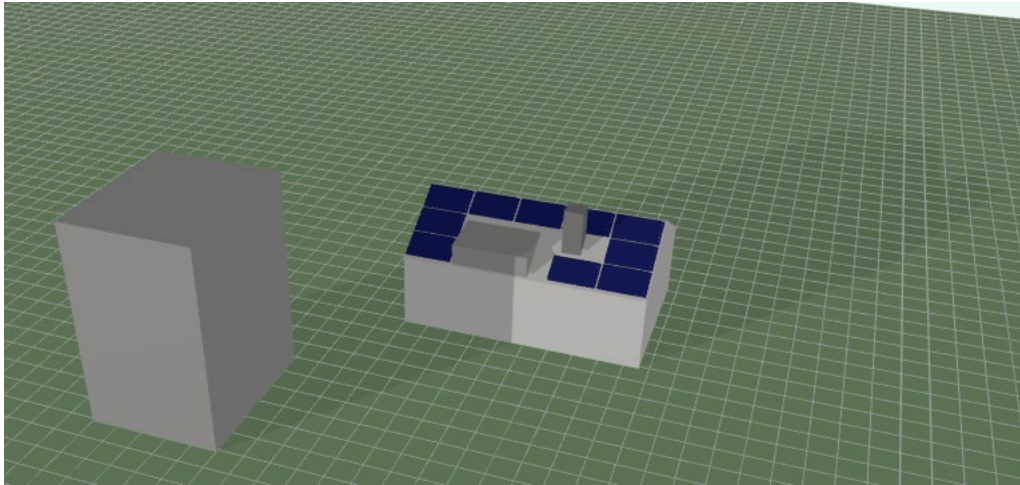


Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung des Schattenwurfs durch ein beliebig gesetztes Objekt, wie auch durch Gaube und Kamin, auf eine PV-Dachanlage.

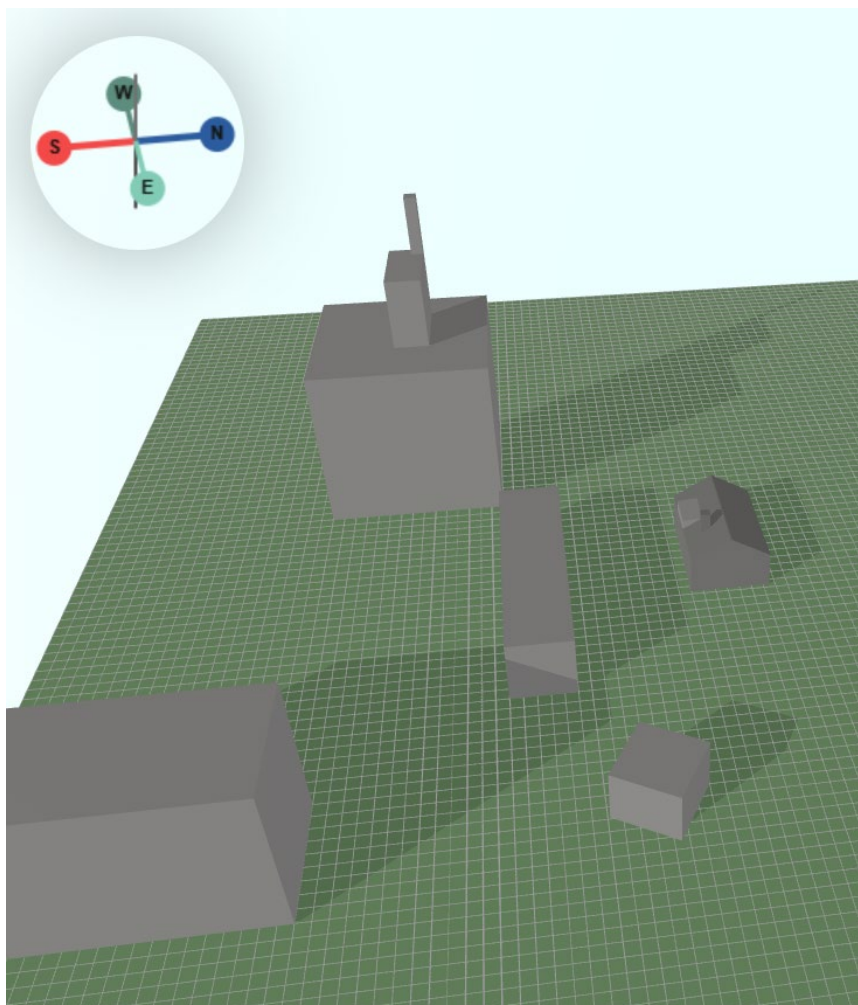


Abbildung 2: Verschattung im städtischen Umfeld. Die Kombination mehrerer Objekte ist einfach machbar und ermöglicht prinzipiell auch das Einfügen eines Horizontes zur Darstellung einer Fernverschattung.

Das Erstellen der neuen Umsetzung war arbeitsintensiv, erlaubt nun aber eine einfache Auswahl von Komponenten und den Aufbau komplexer Verschattungsszenarien bei sehr viel höherer Rechengeschwindigkeit. In Abbildung 1 wird beispielhaft der Schattenwurf eines beliebig gesetzten Objektes auf eine PV-Dachanlage gezeigt.

Durch den einfacheren Aufbau können nun Objekte kombiniert und beliebig platziert werden. In Abbildung 2 wird dies anhand einer imaginären Verschattungsszenarie in städtischer Umgebung gezeigt.

Das Programm ermöglicht wie gehabt eine Ausgabe berechneter Szenarien über ein User-Interface (UI), wobei typischerweise jeweils ein Jahr simuliert wird. Als Default hinterlegt hierfür sind Wetterdaten des Jahres 2018 für den Standort Zürich, aber prinzipiell sind auch andere Standorte und Meteodaten verwendbar.

In Abbildung 3 ist die Ausgabe der Jahressimulationen im «WebPVShade»-Tool für ein typisches PV-Dach mit Kamin und Gaube dargestellt (SINV, allMLPE und IndMLPE) mit der Anzeige der besten Variante und der der relativen Verluste der beiden anderen Varianten rechts im Fenster «Simulation Results». Dort werden auch die «Shading Adapted Efficiency» der Varianten, sowie deren AC-Ertrag angezeigt. Links im Fenster ist die Auswahl verschiedener Szenarien über Scrollbar und Tags möglich.

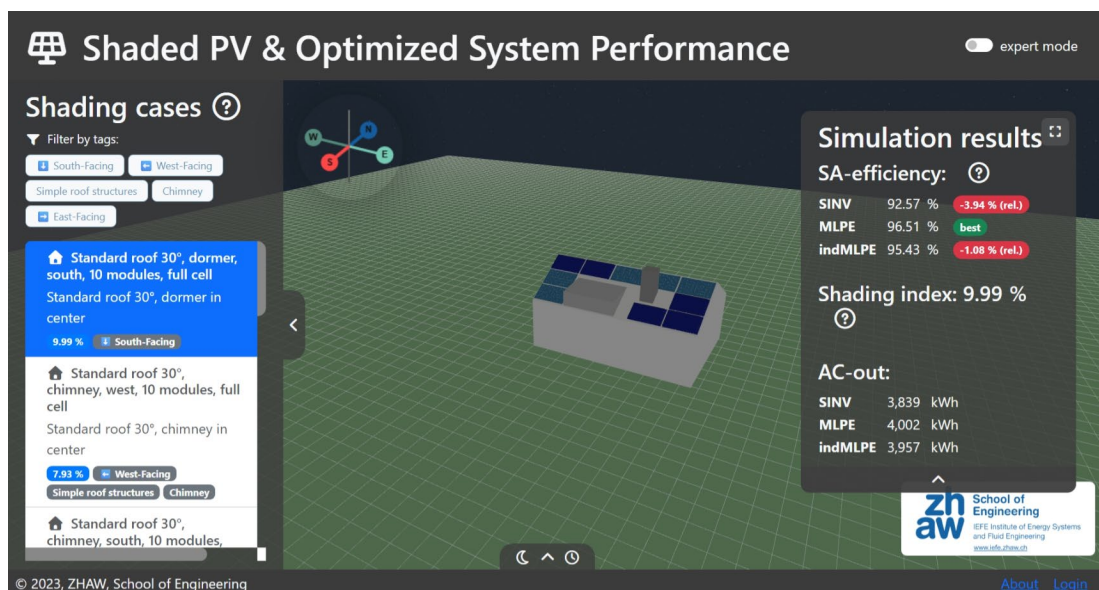


Abbildung 3: Ausgabe der Ergebnisse (SINV MLPE und IndMLPE) einer Jahressimulation für das abgebildete PV-Dach. Im rechten Fenster die beste Variante, sowie die relativen Verluste der anderen Varianten, "Shading Index" und Ertrag. Links Szenarien-Auswahlfenster.

Die helleren Module in der Abbildung kennzeichnen die Module, welche mit IndMLPE ausgestattet sind. Durch das Anklicken des Feldes öffnet sich ein Fenster (Abbildung 4), welches bei Bedarf noch weitere Informationen und Details zu Lay-Out und Erträgen der Systeme anzeigt.

	SINV	Independent MLPE	all MLPE
Inverter type	Huawei, 3.68KTL-L1	Huawei, 3.68KTL-L1	Solaredge, SE3500H
Optimizer system	-	Huawei, SUN2000-450W-P2	Solaredge, P370
Module type	10 x LG NEON2 LG350N1C		
Inclination: 30°	Plant size: 18.2 m ²	Peak power: 3.5 kW	
Rotation: 0°	Theoretical DC-max: 4,146.8 kWh		
Environment Simulation			
Shading index: 9.99			
Simulation results			
Performance ratio: 0.97			
	SINV	Independent MLPE	all MLPE
AC-out	3,838.8 kWh (-4.0%)	3,957.3 kWh (-1.3%)	4,002.1 kWh
DC-out	3,955.2 kWh	4,072.6 kWh	4,055.2 kWh
AC-out (specific)	1,096.8 kWh/Wp	1,130.6 kWh/Wp	1,143.4 kWh/Wp
SA-efficiency (AC)	92.57 %	95.43 %	96.51 %
SA-efficiency (DC)	95.38 %	98.21 %	97.79 %
Total energy loss (to DC max.)	-7.43 %	-4.57 %	-3.49 %

Abbildung 4: Details zu Komponenten, Lay-Out und Erträgen sind direkt abrufbar.

Unten im «User Interface» kann ein Bedienelement aufgerufen werden bei welchem über zwei Schieber für Datum und Tag stufenlos der Sonnenstand und der resultierende Schattenwurf eingestellt werden kann (Abbildung 5).

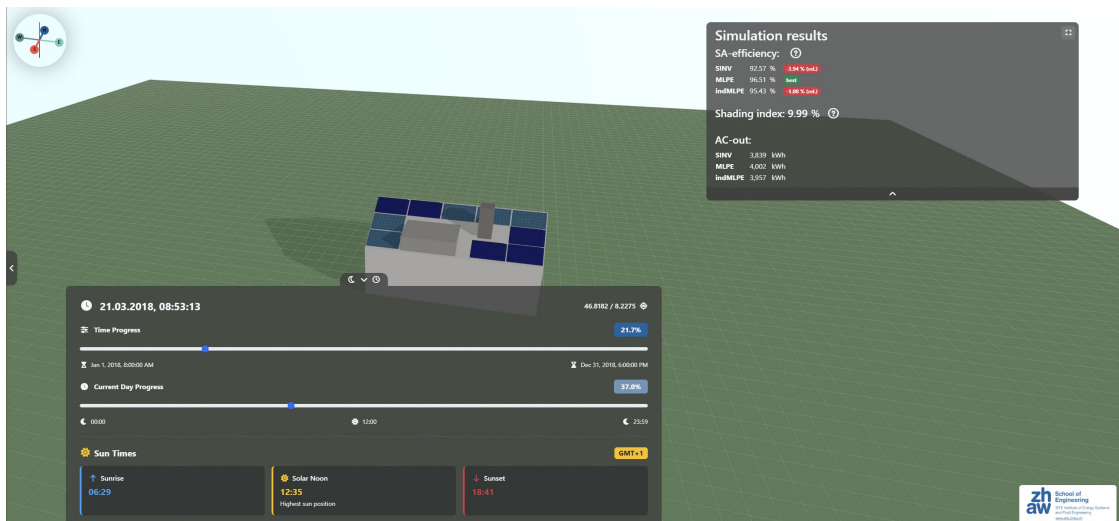


Abbildung 5: Über Schieber einstellbares Datum und Uhrzeit mit resultierendem Schattenwurf.

Im «Expert Mode» können dabei ebenfalls über die Schieberegler zusätzlich noch stufenlos die Verschattung des Modulfeldes zu jedem Zeitpunkt, wie auch die resultierenden Systemkennlinien (IV- und Leistung) des Systems ausgegeben werden (Abbildung 6).

Current Date Simulation Results

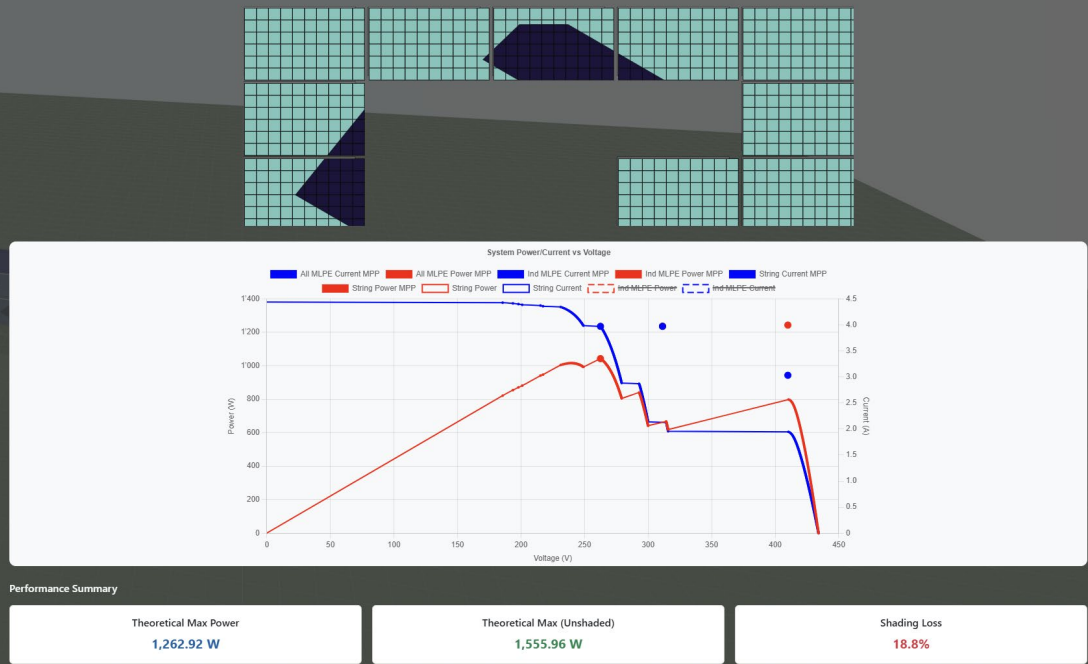


Abbildung 6: Zu jedem gewählten Zeitpunkt kann das Verschattungsbild auf die Module wie auch die Systemkennlinie (IV- und Leistung) ausgegeben werden.

Ebenso können für jeden Zeitpunkt die resultierenden Kennlinien der einzelnen Module ausgegeben werden (Abbildung 7). Durch Verschieben des Zeit- und Datumreglers werden die Verschattungssituationen und die resultierenden Kennlinien wie in einem Film durchlaufen und die Effekte können so Schritt für Schritt auf Modul- und sogar Zelllevel nachverfolgt werden.

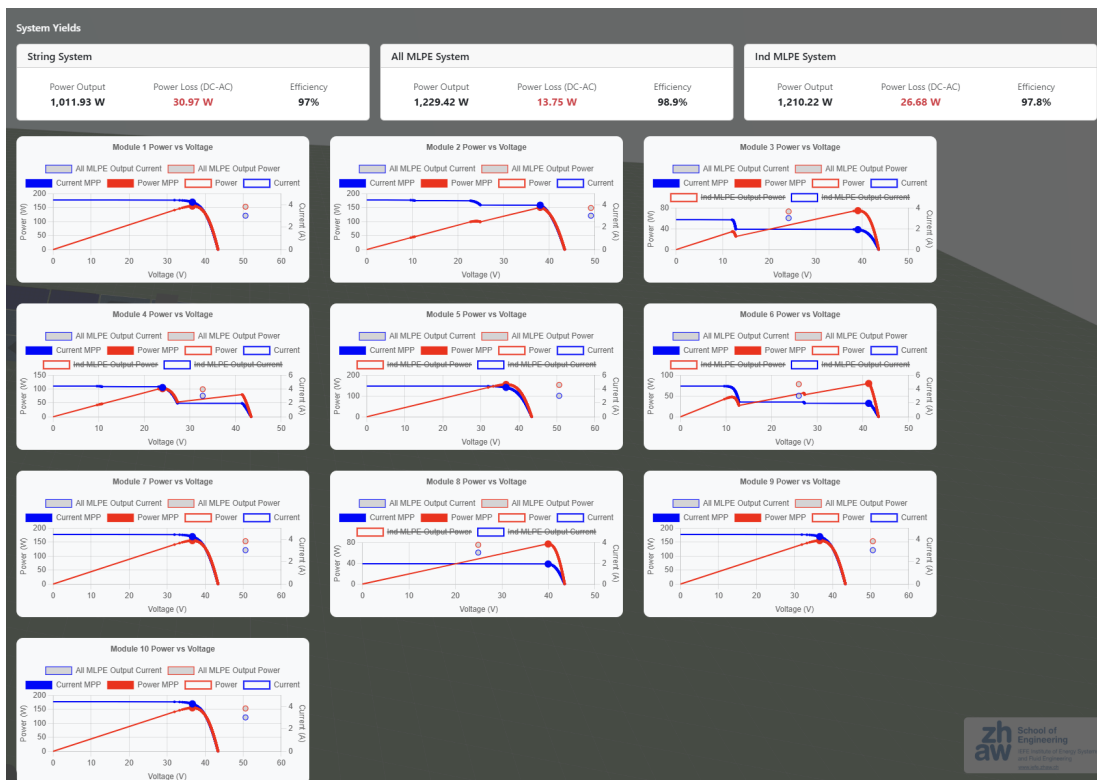


Abbildung 7: Kennlinien der Einzelmodule können für jeden Zeitpunkt ausgegeben werden.

Zusätzlich können für jeden Zeitpunkt der Simulation resultierende charakteristische Systemdaten abgerufen werden (Abbildung 8).

Performance Summary								
Theoretical Max Power 1,262.92 W			Theoretical Max (Unshaded) 1,555.96 W			Shading Loss 18.8%		
System Yields								
String System			All MLPE System			Ind MLPE System		
Power Output 1,011.93 W	Power Loss (DC-AC) 30.97 W	Efficiency 97%	Power Output 1,229.42 W	Power Loss (DC-AC) 13.75 W	Efficiency 98.9%	Power Output 1,210.22 W	Power Loss (DC-AC) 26.68 W	Efficiency 97.8%

Abbildung 8: Charakteristische Systemdaten zu jedem Zeitpunkt.

Beispielhafte Demonstration - Verschattungsvariation

Im neuen Tool können nun vergleichende Szenarien einfach und schnell umgesetzt und simuliert werden. Als Beispiel wird hier eine Konfiguration von Modulen, Invertern und MLPE in jeweils dem gleichen Grundaufbau herangezogen und in verschiedenen Verschattungsszenarien eine Jahressimulation durchgeführt.

Jeweils 10 Module (350 Wp) werden dabei in drei Konfigurationen mit Stringinverter (SINV), nur mit MLPE (allMLPE) und in einem gemischten System mit nur einzelnen MLPE (IndMLPE) mit den in Abbildung 9 gezeigten Komponenten simuliert.

	SINV	independent MLPE	all MLPE
Inverter type	Huawei, 3.68KTL-L1	Huawei, 3.68KTL-L1	Solaredge, SE3500H
Optimizer system	-	Huawei, SUN2000-450W-P2	Solaredge, P370
Module type ⓘ	10 x LG NEON2 LG350N1C		

Abbildung 9: Komponenten wie bei der im Folgenden gezeigten beispielhaften Variation von Verschattungssituationen eingesetzt.

Die Stringlänge und die Anzahl der IndMLPE wurde so gewählt, dass sie mit den gegebenen Komponenten realisierbar sind. Die Auswahl ist nicht für jeden Ansatz optimal. So ist der String für den allMLPE-Fall eher kurz, die Anzahl der IndMLPE würde bei den Szenarien in der Realität eventuell anders günstiger gewählt werden. Dennoch wurde hier die Anzahl der Komponenten bewusst konstant gehalten, um anzahlsspezifische Effekte zu vermeiden.

Als Beispiel wird in Abbildung 11 ein Süd-Dach mit 30° Dachneigung in verschiedenen Szenarien mit variiertem Shading-Index und der Übergang zum Flachdach gezeigt. Über den Shading-Index kann den Szenarien ein Faktor zur Quantifizierung des Verschattungsgrades zugeordnet werden, was eine gewisse Systematisierung erlaubt.

$$SI_{DC,Max}[\%] = 1 - \frac{\sum_{t=0}^{T=1yr.} \sum_{i=1}^{k=nModules} P_{Mod,i,MPP,shaded}}{\sum_{t=0}^{T=1yr.} \sum_{i=1}^{k=nModules} P_{Mod,i,MPP,unshaded}} \cdot 100$$

Abbildung 10: Berechnung des Shading-Index aus dem Verhältnis der Summe der maximal möglichen DC-Beiträge aller Module des verschatteten Systems, was auch bei unterschiedlichen Modulströmen sein kann, zu jenen des angenommen unverschatteten Systems. (siehe Ref. IEA PVPS T13 – 27 – 2024)

In Abbildung 11 werden von oben nach unten Systeme mit abnehmendem Shading-Index aber gleichem Strangaufbau der Module dargestellt. Lediglich die Position der IndMLPE-Module (helleres blau) wird bei den Flachdach-Simulationen geringfügig abgeändert, die Anzahl bleibt gleich.

Der Shading-Index variiert von ca. 16 %, was sehr starker Verschattung unter realen Bedingungen entspricht, bis zum unverschatteten System mit 0 %, dessen AC-Ertrag (mit Stringinverter-SINV) auch als Referenz für die ebenfalls angegebenen AC-Erträge der Szenarien dient.

Farbig hervorgehoben (rechts) ist der relative Unterschied der "Shading Adapted Efficiency" zur jeweils besten der drei Varianten in Prozent. Durch diese Zahl wird die beste Variante (grün) identifiziert und der relative Verlust der anderen Optionen dargestellt. Dies für flexibel einzugebende Szenarien zu ermöglichen war ein wesentliches Ziel beim Aufsetzen des Simulationstools «PVShade».

Bei stärkerer bis extremer Teilverschattung, entsprechend den oberen Segmenten in Abbildung 11, sind wie zu erwarten Systeme mit MLPE überlegen.

Im unverschatteten und leicht verschatteten Fall ist der Stringinverter überlegen, da der Nutzen der MLPE ohne Verschattung dort nicht zum Tragen kommt, aber die einzelnen MLPE mit ihren jeweiligen gerätespezifischen Verlusten zu einem etwas höheren Gesamtverlust beitragen. Bei längeren Strängen käme dieser Effekt, und somit der Vorteil des Stringinverters, noch stärker zum Tragen als bei den hier gezeigten Beispielen.

Der Wechsel der günstigsten Variante findet bei den hier gezeigten Beispielen ab einem Shading-Index von ca. 1.5 % statt. Auch wenn der Shading-Index als Masszahl zur Beurteilung von Verschattungssituationen herangezogen wird, kann anhand dieser Zahl keine allgemeingültige, für alle denkbaren Szenarien passende, sondern nur eine angenäherte Grenze definiert werden. Unter Berücksichtigung auch früherer Untersuchungen (z.B. Kapitel 7.1 des IEA PVPS T13 27-2024 Bericht aus der Publikationsliste) kann gesagt werden, dass der Übergang zu eher günstigen Verhältnissen für MLPE- und SINV-Varianten bei einem Shading-Index zwischen den hier demonstrierten ca. 2 % und stärkeren Verschattungen von etwa 5 % liegt.

Hierbei ist anzumerken, dass das Thema Verschattung auch bereits vor verbreitetem Einsatz der MLPE bekannt war und die Auslegung der Anlagen einen starken Effekt hat. Bei überlegter PV-Modulbelegung, was erfahrenen Planern bewusst sein wird, wird die Mehrzahl der Anwendungsfälle im unteren Bereich dieses Shading-Index Bereiches liegen.

Der relative Unterschied der IndMLPE- zur allMLPE-Variante ist mit unter einem Prozent Verlust bei den schwachen Verschattungen auffallend gering und bleibt auch bei starken Verschattungen unter drei Prozent. Die geringe Abweichung zeigt, dass der Einsatz von MLPE an kritischen Punkten des PV-Systems, und insbesondere bei schwacher Verschattung, deutliche Vorteile zur SINV-Variante erbringen kann, ohne dass alle Module mit MLPE bestückt werden müssen. Dazu muss nochmals erwähnt werden, dass hier die Auslegung der IndMLPE-Varianten wegen der fixen Komponenten hier teilweise nicht so gewählt wurde, wie dies optimal gewesen wäre und auch, dass der Nutzen stark von der Anzahl der eingesetzten MLPE abhängt.

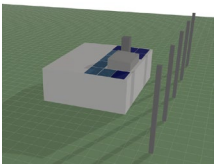
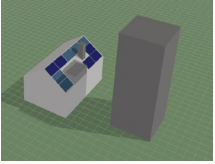
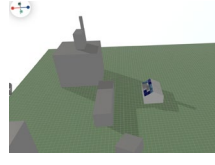
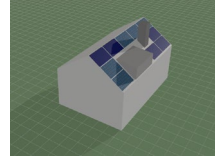
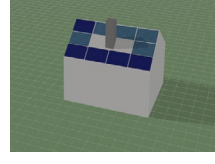
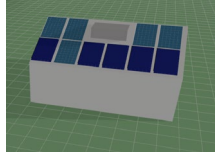
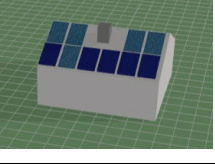
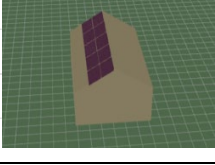
Flachdach mit Flaggenmasten (Süd) und Aufbauten				
	SI: 15.6 %	SINV	allMLPE	indMLPE
	SA- η [%]:		90.4	95.5
	SA-η rel. [%]		-5.5	0.0
	AC-kWh rel. zu Ref. [%]		57.7	61.1
Grosses Verschattungsobjekt nahe vor Süd-Dach 30° mit Kamin und Gaube				
	SI: 12.7 %	SINV	allMLPE	indMLPE
	SA- η [%]:		91.3	95.9
	SA-η rel. to best [%]		-4.6	0.0
	AC-kWh rel. zu Referenz [%]		73.9	77.6
Städtische Umgebung vor Süd-Dach 30° mit Kamin und Gaube				
	SI: 10.2 %	SINV	allMLPE	indMLPE
	SA- η [%]:		93.1	96.4
	SA-η rel. to best [%]		-3.3	0.0
	AC-kWh rel. zu Referenz [%]		83.5	86.5
Süd-Dach 30° mit Kamin und Gaube				
	SI: 10.0 %	SINV	allMLPE	indMLPE
	SA- η [%]:		93.1	96.4
	SA-η rel. to best [%]		-3.9	0.0
	AC-kWh rel. zu Referenz [%]		84.7	88.3
Süd-Dach 30° mit Kamin zentral				
	SI: 7.9 %	SINV	allMLPE	indMLPE
	SA- η [%]:		94.1	96.5
	SA-η rel. to best [%]		-2.4	0.0
	AC-kWh rel. zu Referenz [%]		88.7	90.9
Süd-Dach 30° mit Gaube in Giebelnähe				
	SI: 1.5 %	SINV	allMLPE	indMLPE
	SA- η [%]:		96.8	96.7
	SA-η rel. to best [%]		0.0	-0.1
	AC-kWh rel. zu Referenz [%]		97.7	97.6
Süd-Dach 30° mit Kamin in Giebelnähe				
	SI: 1.3 %	SINV	allMLPE	indMLPE
	SA- η [%]:		97.4	96.7
	SA-η rel. to best [%]		0.0	-0.3
	AC-kWh rel. zu Referenz [%]		98.1	97.7
Süd-Dach 30° (Referenz mit SINV)				
	SI: 0 %	SINV	allMLPE	indMLPE
	SA- η [%]:		97.6	96.7
	SA-η rel. to best [%]		0.0	-0.9
	AC-kWh rel. zu Referenz [%]		100.0	99.1

Abbildung 11: Beispiel Jahressimulation mit variiertem Verschattung für die jeweils gleiche Strangkonfiguration. Farbig hinterlegt (rechts) ist der relative Unterschied der "Shading Adapted Efficiency" zur jeweils besten der drei Varianten (grün).

Wie erwartet nimmt der Vorteil der MLPE-Variante mit zunehmender Verschattungskomplexität zu. Dennoch bleibt der Vorteil durch die MLPE auch bei den Szenarien mit den höchsten SI-Werten im Bereich von 5 % relativ zum Stringinverter-System. Der Nutzen ist somit gegeben, bleibt aber deutlich hinter dem teilweise beworbenen «bis zu 30 %-Gewinn» zurück.

Ein Ziel des Projekts war den Effekt von MLPE gegenüber dem Standard verständlich und visuell erfassbar darzustellen, sodass Nutzer die Ergebnisse auf ihr System, oder ein Sie interessierendes System, annähernd übertragen können. Nutzer können sich bereits jetzt durch die oben gezeigten Varianten, die als Default-Szenarien in «WebPVShade» eingestellt werden, klicken, um die entsprechenden Simulationen, Schattenverläufe, Teilergebnisse selbst abrufen zu können. Selbst wenn alle möglichen Fälle in Form von Beispielen nie vollständig erfasst werden können, stellen diese Variationen bereits eine Grundlage dar, anhand derer der MLPE-Nutzen potenziellen Kunden, Praktikern, aber auch Experten dargestellt werden kann. Erweiterungen sind jederzeit möglich und können einfach erstellt und ergänzt werden

Weitere Nutzungs-Optionen

Das primäre Ziel der «PVShade»-Software war und ist die Darstellung des Vergleichs von SINV, MLPE und IndMLPE im Vergleich.

Mit dem «PVShade»-Tool in der neuen Form können aber auch einfach und schnell andere Aufgabenstellungen bearbeitet werden. Als Beispiel wird in Abbildung 12 die Darstellung des Schattenwurfs zu bestimmten Jahres- und Tageszeiten gezeigt, die wie gesagt auch für komplexere Szenarien einfach möglich ist.

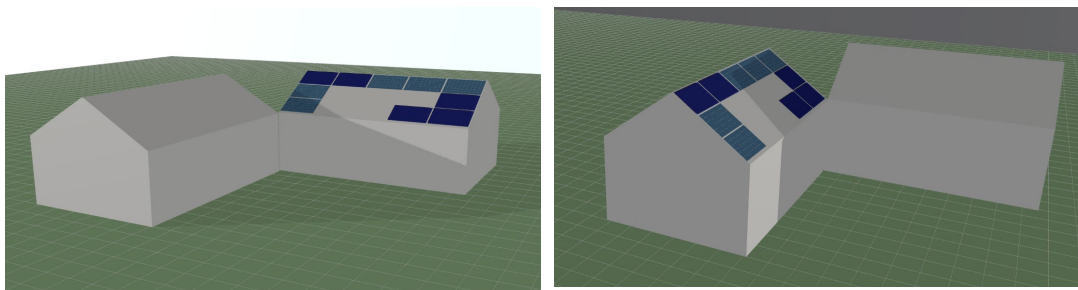


Abbildung 12: Analyse Schattenverlauf spezifischer Anordnungen hier am Beispiel einer L-Anordnung zweier Gebäude (PV-Südausrichtung links, PV-Ostausrichtung rechts).

Durch die hohe Ortsauflösung drängt sich dabei die Anwendung zum Vergleich verschiedener Modultypen an, auch sogenannter verschattungsresistenter Module.

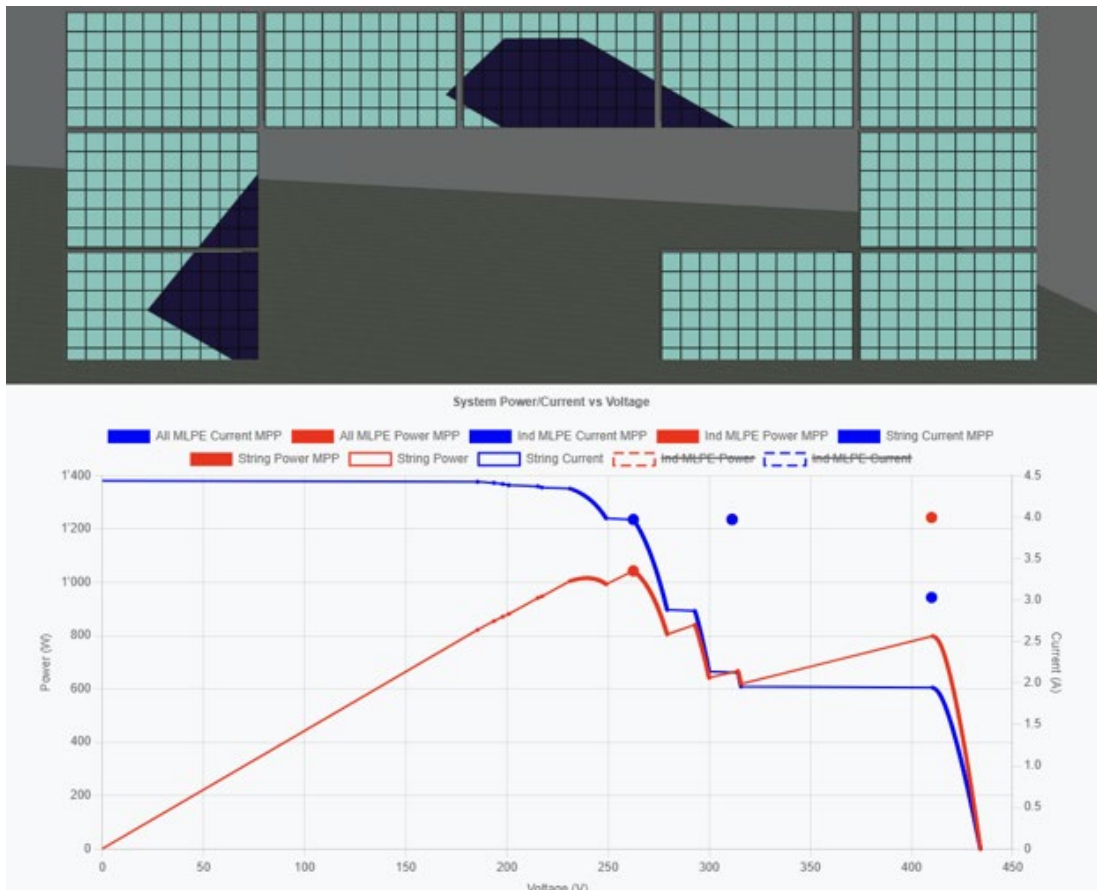


Abbildung 13: (Zoom aus Abbildung 6) Simulation einzelner Module mit Ortsauflösung auf Zellebene. Hierdurch ideal geeignet, um den Effekt verschiedener Modultypen, auch verschattungsresistenter Typen, in teilverschatteten Systemen zu simulieren.

Dies wurde in begrenztem Umfang bereits umgesetzt, um die heute übliche «Butterfly»-Modulkonfiguration zu simulieren, welche auch mit geringerer Verschattungsempfindlichkeit beworben wird.

Thematisch muss das auch in Verbindung zu den bisherigen Aufgaben gesehen werden, da sowohl der Einsatz von MLPE wie auch von verschattungsresistenten Modulen, auf die Minimierung von Verschattungseffekten abzielt. In Anbetracht des grossen Interesses an diesem Thema, das sich insbesondere am Marktanteil von MLPE zeigt, ist es naheliegend den Effekt von verschattungsresistenten Modulen und sogar die Kombination beider Ansätze zu untersuchen.

Mit dem vorgestellten Tool ist das nur für bestimmte Modultypen möglich, wurde aber aus zeitlichen Gründen mit der neuen Softwaregeneration noch nicht in der systematischen Form, wie oben für die MLPE gezeigt, umgesetzt.

Für bestimmte Modultypen, wie das erwähnte «Butterfly» Lay-Out, ist die Simulation bereits möglich. Dabei wird auf eine Berücksichtigung der Sperrkennlinie der Solarzellen verzichtet, was bei diesen Modulen eine Vereinfachung darstellt, die sich aber im Wesentlichen nur durch einen veränderten Kurvenverlauf mit Steigungen statt den Plateaus zwischen den Sprüngen der IV-Kennlinie in Abbildung 13 zeigt. Für die im Moment im Fokus stehenden verschattungsresistenten Modultypen auf der Basis von Solarzellen mit «integrierter Bypassdiode» müsste dies jedoch noch entsprechend angepasst werden. Dies

wäre früher wegen des erhöhten Rechenaufwandes nur schwer umsetzbar gewesen, sollte nun aber realisierbar sein.

Abschliessend soll nochmals gesagt werden, dass die systematische Darstellung weiter oben (Abbildung 11) typische Systeme erfassen sollte, dass damit aber die nun mögliche Komplexität noch bei weitem nicht ausgeschöpft ist. So könnten nun auch ungewöhnlichere Fassaden-Systeme (Abbildung 14) oder z.B. in alpiner Umgebung eingesetzten Solarbäume simuliert werden.

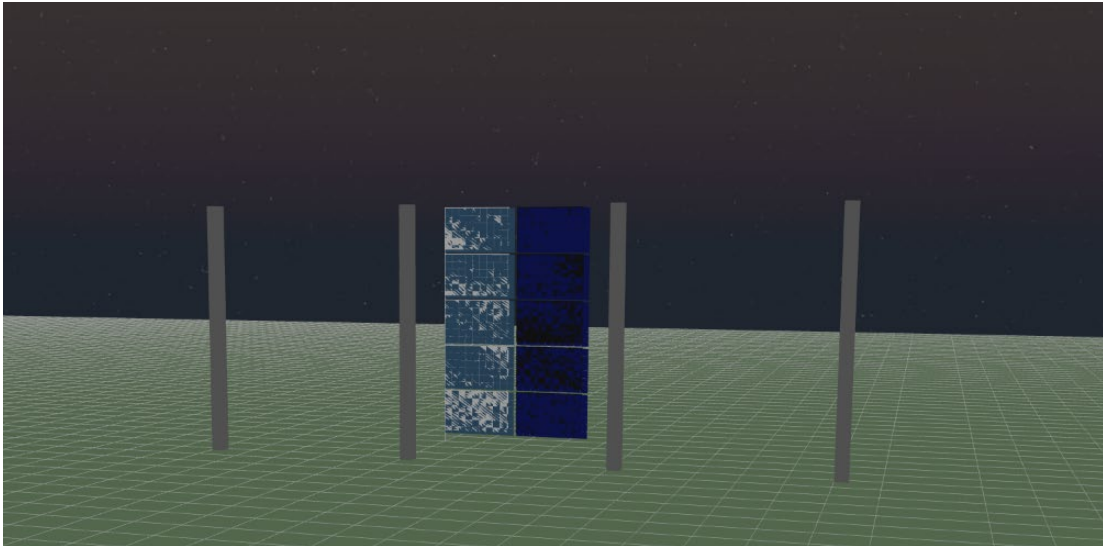


Abbildung 14: Das Programm lässt nun auch die Simulation komplexerer oder ungewöhnlicherer Systeme zu als bei der Darstellung typischer Anwendungen in Abbildung 11.

Fazit und Ausblick

Ein Ziel des Projektes war es anwendungsnahe Projektbeispiele von verschatteten PV-Systemen zu berechnen und Interessierten über eine Webseite zur Verfügung zu stellen. Dazu war die Verbesserung des bestehenden Tools der an der ZHAW entwickelten Softwarepaket nötig.

Gemäss der Erwartung, dass stärker verschattete PV-Systeme einen Vorteil mit MLPE gegenüber SINV haben, sollten viele anschauliche Beispiele mit variiertem und auch hohen Verschattungsgrad dargestellt werden. Ein wesentliches Ergebnis war, dass auch bei unter real möglichen Bedingungen stark verschatteten Systemen der jährliche Mehrertrag durch Einsatz von MLPE im mittleren einstelligen Prozentbereich bleibt. Bei der Mehrzahl der Fälle in der Praxis, dürfte die Modulbelegung so gewählt werden können, dass der Shading-Index unter ca. 2- 5 % liegt und dabei kein wesentlicher Ertragsvorteil für MLPE besteht.

Voraussetzung für die vergleichende Darstellung ist die korrekte quantitative Berechnung von Systemen mit Stringinvertoren, MLPE und IndMLPE in Verschattungsszenarien variiertem Komplexität über das «PVShade»-Tool. Wenn dies auch bereits mit dem bisher eingesetzten Matlab-basierten Programm prinzipiell möglich war, so wurde dieses Ziel erst mit der neuen Fassung vollständig erreicht. Das nun neu umgesetzte Tool ermöglicht die Umsetzung auch komplexerer Szenarien bei wesentlich höherer Berechnungsgeschwindigkeit und einfacherem Handling. Weitere Komponenten und Szenarien können nun jederzeit ergänzt werden, der Code ist der gebräuchlicheren Java-Programmiersprache auch zukünftigen

Entwicklern besser zugänglich. Als derzeit bestehende Einschränkung wäre zu erwähnen, dass bislang alle Module eines Strangs als in einer Ebene liegend angenommen werden.

Ein weiteres wesentliches Ziel des Projekts ist die vergleichende Darstellung von Systemen mit SINV, MLPE und IndMLPE auf einer öffentlich zugänglichen Plattform «WebPVShade» visuell erfassbar darzustellen.

Grundsätzlich bleibt die Schwierigkeit bestehen, dass dies in Form von Beispielen dargestellt werden soll und muss, wenn man obiges Ziel erreichen möchte. Das Ergebnis bleibt dabei von der spezifischen Verschattungssituation abhängig, was die direkte Übertragung auf ein interessierendes spezifisches System immer erschweren wird. Dennoch besteht durch die Darstellung von Szenarien mit variiertem Shading-Index, wie in obigen Report gezeigt, die Möglichkeit einer annähernden Systematik.

Die gezeigten Beispiele sind auf der öffentlich zugänglichen Plattform als Default-Optionen hinterlegt und können gezielt aufgerufen werden. Die im Report gezeigte zusammenfassende Darstellung könnte als zu öffnendes PDF-Dokument hinzugefügt werden, um dem Nutzer einen einfachen Überblick zu ermöglichen. Dennoch hat er auch die Möglichkeit, selbst Details der Simulation zu betrachten und beliebige Zeitpunkte anzufahren, um die resultierenden Schatten- und IV-Kurvenverläufe zu studieren. Letztlich bleibt aber das Ergebnis, insbesondere in Form der relativen Verluste je nach Variante, das am Ende in den meisten Fällen entscheidendste Ergebnis, insbesondere für den «Nicht-Spezialisten».

Der ursprüngliche Ansatz beim Aufsetzen des Projektes war, dass Hersteller oder am Vertrieb von MLPE interessierte Firmen, komplexe Szenarien beauftragen, um den Nutzen ihrer Geräte demonstrieren zu können. Dies kam trotz Interesse nicht zustande. Einerseits war dies der wirtschaftlichen Situation der Branche geschuldet, andererseits sind die Ergebnisse, auch bei starker Verschattung, nicht so überzeugend, dass sie, insbesondere in Anbetracht der typischerweise genannten Ertragsgewinne, überzeugen könnten. Dies gilt insbesondere auch deswegen, weil die Konkurrenz mit ähnlichen Zahlen wirbt.

Die Darlegung der entsprechenden Ergebnisse erfolgte im Projektzeitraum insbesondere durch die Aktivitäten von Herrn Prof. Dr. Baumgartner, aber auch von Herrn Cyrill Allenspach, in Form von zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen, Veröffentlichungen, Vorträgen und nicht zuletzt durch die Arbeiten im IEA-Task 13 auf diesem Gebiet. Insofern wurden die grundlegenden Erkenntnisse aus dem Projekt auch in der Fachwelt und der interessierten Öffentlichkeit weithin bekannt gemacht. Die Arbeiten haben in der Fachwelt ein breites Echo gefunden und werden weit diskutiert. Die Relevanz ist hoch wie sich an den Marktanteilen der MLPE, insbesondere auch in der Schweiz, zeigt. Von daher sollten die gewonnenen Erkenntnisse auch weiterhin publiziert werden.

Eine Möglichkeit wäre das Tool auch weiterhin einzusetzen und die Möglichkeiten zu erweitern. Dies wäre sehr gut durch die Analyse verschattungsresistenter Module möglich. Auch dieser Ansatz zielt auf die Reduzierung von Verlusten durch Teilverschattung ab und kann mit dem «PVShade»-Tool gut simuliert werden, da die Verschattungsanalyse räumlich aufgelöst auf Zellenlevel arbeitet. Einige Modultypen könnten bereits jetzt eingebunden werden, für die aktuell relevanteren Typen mit «integrierter Bypassdiode» in den Zellen müssten noch Anpassungen vorgenommen werden. Dies würde den direkten Vergleich der Effekte von Optimierern und verschattungsresistenten Modulen, auch in Kombination, ermöglichen.

Publikationen

Publikationen studentischer Arbeiten an der ZHAW

Baumann, Linus; Widler, Alain; Projektarbeit ZHAW SoE SG EU im Herbstsemester 2023; *Maximum Power Point-Regelung von PV-Optimizer*

Baumann, Linus; Widler, Alain; Bachelorarbeit ZHAW SoE SG EU im Frühjahrsemester 2024; *Optimales Photovoltaik-Systemdesign mit Optimizer oder String-Inverter*

Iseni, Rijad; Martinelli, Robin; Projektarbeit ZHAW SoE SG EU im Herbstsemester 2024; *Das exakte Winterstrompotential von Solarbäumen in alpinen Photovoltaik Kraftwerken*

Iseni, Rijad; Martinelli, Robin; Bachelorarbeit ZHAW SoE SG EU im Frühjahrsemester 2024; *Performance Analyse von verschatteten Photovoltaik Kraftwerken*

Anmerkung:

Projektarbeit 6 Credits - Arbeitsumfang pro Student 180 Stunden

Bachelorarbeit 12 Credits - Arbeitsumfang pro Student 360 Stunden

Allgemein zugängliche Publikationen

Baumgartner, Franz 2025, [Mehr Elektronik aufs Dach?](#); Electrosuisse Bulletin.ch, 2025 No 6;

Baumgartner Franz; Allensbach Cyril; et al; 2024. [Performance of Partially Shaded PV Generators Operated by Optimized Power Electronics](#). International Energy Agency Report IEA-PVPS T13-27:2024; ISBN 978-3-907281-64-2

Allenspach, Cyril Armand; Carigiet, Fabian; Bänziger, Arturo; Schneider, Andrin; Baumgartner, Franz, 2022. [Power conditioner efficiencies and annual performance analyses with partially shaded photovoltaic generators using indoor measurements and shading simulations](#). Solar RRL. 7(8), S. 2200596. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1002/solr.202200596>

Baumgartner, Franz P.; [Klenk, Markus](#); Widler, Adrian; Baumann, Linus, 2024. [MPP tracking losses of module level power electronics at partial module shading](#). In: Proceedings of the 41st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. (EU PVSEC), Vienna, Austria, 23-27 September 2024. Munich: WIP. S. 020289-001-020289-006. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC2024/3EO.1.5>

Baumgartner, Franz; Baumann, Linus; Widler, Alain; Allenspach, Cyril; [Weniger Komplexität und mehr Zuverlässigkeit hinter jedem Solarmodul](#); 18. Symposium Energieinnovation, 14.-16.02.2024, an der Technischen Universität Graz/Austria

Baumgartner, Franz; Vogt, Roman; Allenspach, Cyril Armand; Carigiet, Fabian, 2021. [Performance analysis of shaded PV module power electronic systems](#). In: Proceedings of the 38th EUPVSEC. 38th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC), online, 6-10 September 2021. München: WIP.S. 650-654. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20212021-4CO.3.1>

Allenspach, Cyril Armand; Gonzalez de Echavarri Castro, Victor; Richter, Samuel; Meier, Christoph; Carigiet, Fabian; Baumgartner, Franz, 2020. [Module-level power electronics under indoor performance tests](#). In: Proceedings of the 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Online, 7-11 September 2020. WIP Renewable Energies. S. 1188-1194. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20202020-4AV.3.8>

Allenspach, Cyril Armand; Baumgartner, Franz, 2023. [Performance of power optimizer versus string inverter systems](#). In: 21. Schweizer Photovoltaik-Tagung, Bern, Schweiz, 20.-21. März 2023. ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.21256/zhaw-27169>

BFE-Projekt: EFFPVSHADE – *Effizienzanalyse von dezentraler Photovoltaik-Leistungselektronik bei Teilbeschattung* (SI/502247-01).

Anhang 1

Technischer Bericht, Stand 20.10.2025

Verfasst von Josias Ribí
WebPVShade V2 Beta

Zusammenfassung

Dieser Anhang dokumentiert eine umfassende Überarbeitung und Modernisierung der WebPVShade-Anwendung nach einem Jahr intensiver Weiterentwicklung. Das Projekt hat erfolgreich den Schritt von einem komplexen, fragmentierten Technologie-Stack hin zu einer einheitlichen, modernen und sehr gut wartbaren Architektur vollzogen.

Zentrales Ergebnis: Vollständige Vereinheitlichung des Backends. Das wichtigste Ergebnis dieses Entwicklungszyklus ist die vollständige Migration der PV-Simulationslogik vom alten MATLAB-Code in das Java-Spring-Boot-Backend. Diese Architekturentscheidung beseitigt technische Hürden und Komplexität im Betrieb. Die bisherige Architektur war fragmentiert, komplex und schlecht wartbar. Sie basierte auf veralteten Ansätzen, welche erhebliche Probleme im Programmablauf verursacht haben:

Beispielhaft aufgeführte Probleme:

- Die Simulation basierte auf einem veralteten und schlecht gepflegten MATLAB-Code.
- Qualität der Programmierung: Der bisherige MATLAB-Code war schwer zu verstehen, anzupassen und zu erweitern.
- Leistungs-Thematik: Die Simulationen waren extrem langsam und wiesen massive Mängel bei der Arbeitsspeichernutzung auf.
- Systemabstürze: Länger laufende Simulationen stürzten häufig wegen Arbeitsspeicherproblemen ab.
- Keine saubere Integration: Der MATLAB-Code war von der Hauptanwendung getrennt. Komplexe Integrationsschichten waren notwendig.

Probleme beim Frontend-Aufbau

Veraltetes AngularJS: Das Frontend basierte auf einer alten AngularJS-Version, ohne modernes, signalbasiertes State-Management. Das erschwerte Wartung und Erweiterbarkeit.

Komplexität beim Build und Deployment

- Java um Node „herumgewickelt“: Das Frontend wurde über einen Java-Wrapper gestartet, der Node.js ansteuerte – unnötige Komplexität.
Aufwendige Entwickler-Setups: Entwickler brauchten lokal bestimmte Versionen von MATLAB, Java und Node.js.
Nicht betriebssystemunabhängig: Manche Abhängigkeiten und Build-Schritte waren plattformspezifisch, was plattformübergreifende Entwicklung erschwerte.
- Infrastruktur-Einschränkungen
- Begrenzte Skalierbarkeit: Die Architektur war nicht cloud-freundlich.
- Schlechte DevOps-Erfahrung: Einrichtung und Wartung basierten auf vielen eigens gebauten, nicht standardisierten Lösungen.

Durch eine modernisierte, vereinheitlichte Architektur konnten die meisten Probleme beseitigt werden.

Grundideen

- Konsolidierung: Gesamte Simulationslogik in einer einzigen, einheitlichen Codebasis zusammenführen.
- Modernisierung: Aktuelle Best Practices und moderne Frameworks einsetzen.
- Vereinfachung: Komplexität in jeder Ebene reduzieren.
- Performance: Bekannte Engpässe und Speicherlecks eliminieren.
- Wartbarkeit: Die Codebasis so gestalten, dass zukünftige Entwickler sie leicht verstehen und erweitern können.

Vollständige Migration der Simulations-Engine nach Java resultierte in einer enormen Verbesserung. Die komplette PV-Simulationslogik wurde aus dem alten MATLAB-Code in das Java-Spring-Boot-Backend portiert. Es gibt keine externen Abhängigkeiten mehr von MATLAB oder anderen separaten Laufzeitumgebungen. Die gesamte Rechenlogik läuft jetzt innerhalb der Anwendung selbst.

Die Leistungsverbesserungen zeigten eine starke Wirkung

- Jahres-Simulationen mit hoher Detailtiefe resultierten zuvor in vielen Stunden Rechenzeit und häufigen Abstürzen. Jetzt ungefähr 10 Minuten Dauer, ohne Abstürze.
- Aktueller Performance-Gewinn: Faktor 10 bis 100, je nach Simulationskomplexität und Szenengröße.
- Zukunftspotenzial: Die neue Architektur ermöglicht weitere Optimierungen durch
 - o Multithreading: Parallele Nutzung mehrerer CPU-Kerne (Potenzial ~5x)
 - o Intelligentes Caching: Zwischenresultate für wiederholte Teilrechnungen.

Optimierungen nicht umgesetzt, aber sind potenziell möglich

Technische Umsetzung

- Effiziente Java-Algorithmen implementiert, MATLAB-Simulationslogik
- Integration in den Lebenszyklus der Spring-Boot-Anwendung
- Umfassendes Error-Handling und Validierung hinzugefügt
- Asynchrone Auftragsverarbeitung für langlaufende Simulationen eingebaut
- Arbeitsspeicherverwaltung und Ressourcenfreigabe sauber implementiert
- Unit-Tests eingeführt, um Simulationsgenauigkeit sicherzustellen und Regressionen zu verhindern.

Modernisierung des Frontends auf aktuelles Angular

Wechsel von AngularJS auf modernes Angular (v19+) und Einsatz von Angular Signals für reaktives State-Management.

- Bessere Wartbarkeit: Gute Zusatztools und Dokumentation. Verbreitet.
- Besseres Developer Experience: Verbesserte IDE-Unterstützung, Debugging-Tools und klarere Fehlermeldungen.
- Zukunftssicherheit: Die aktuelle Framework-Version wird aktiv gepflegt und weiterentwickelt.
- Signal-basiertes State-Management über Angular Signals.

-
- Strenger Typisierungsmodus: TypeScript im „strict mode“ projektweit aktiviert.
 - Moderne Toolchain: Moderne Toolchain für schnellere Builds und bessere Developer Experience.

Containerisierung und DevOps

- Vollständige Docker-Containerisierung von Frontend und Backend für den Produktivbetrieb.
- Keine spezifischen Java- oder Node.js-Versionen mehr, die Entwickler lokal vorhalten müssen.
- Einfache Skalierung und Migration: Container lassen sich auf praktisch jeder modernen Infrastruktur betreiben.
- Vereinfachtes Onboarding: Entwickler können mit im Grunde nur Java und Node.js starten

Weitere Verbesserungen

- Zusätzlich zu den wesentlichen Architekturänderungen wurden zahlreiche Verbesserungen umgesetzt:
- Verbesserte Visualisierung der Simulationsergebnisse: Die Darstellung und interaktive Analyse der Simulationsergebnisse in der Anwendung wurden deutlich erweitert.
- Unterstützung komplexer Szenen: Die Simulationsfähigkeiten wurden so erweitert, dass komplexere und realistischere Szenarien mit höherer Detailtiefe abgebildet werden können.
- Tag-Management: Ein robustes Tagging-System wurde eingeführt, um Simulationen und Projekte besser zu strukturieren und zu organisieren.
- Weitere Verfeinerungen: Verschiedene UI/UX-Verbesserungen, Performance-Optimierungen und Bugfixes im gesamten System.

Aktuelle Einschränkungen und Trade-offs

Wie bei jeder Umarbeitung gibt es bewusste Trade-offs und Funktionen, die in dieser Beta-Version noch nicht umgesetzt wurden. Dieser Abschnitt dokumentiert diese bewusst offen.

Noch nicht verfügbare Funktionen in V2

Dekorative Hausmodelle in der Web-Oberfläche. Die Web-Oberfläche der Version 1 enthielt dekorative Hausmodelle zur Visualisierung. Die neue Version zeigt jetzt direkt das reale 3D-Modell, das auch von der Simulations-Engine verwendet wird. Damit ist die Ansicht der Benutzer und die physikalische Grundlage der Simulation 1:1 deckungsgleich. Zuvor gab es eine „schicke“ Visualisierung im Web, die nicht exakt mit dem MATLAB-Modell übereinstimmte.

Trade-off: Die dekorative (vereinfachte) Visualisierung wurde zugunsten von Simulationsgenauigkeit und Konsistenz entfernt. Zukunft: Solche dekorativen Overlays können später optional wieder ergänzt werden.

Eingeschränkte Auswahl an PV-Hardwaretypen. Nicht alle PV-Modul-Hardwaretypen aus V1 werden derzeit in V2 unterstützt.: Beim Migrieren lag der Fokus auf der korrekten Kern-

Physik der Simulation. Zusätzliche Hardwarevarianten hatten geringere Priorität, um den Beta-Termin halten zu können. Ansatz: Die neue Codebasis ist hochgradig modular und erweiterbar, sodass das Nachrüsten alter (und neuer) Hardwaretypen jetzt deutlich einfacher ist als früher im MATLAB-Code. Nächste Schritte: Fehlende Hardwaretypen können auf Basis von Nutzerbedarf und Anforderungen schrittweise ergänzt werden.