



Illustration Ulrich Fiechtner

Das Wasserstoff-Bildungs-Labor

Energieversorgung mit Grünem Wasserstoff

Ein Lehr- und Lernprojekt
des Solarvereins Marbach am Neckar e.V.
des Friedrich-Schiller-Gymnasiums Marbach
und der Stadt Marbach am Neckar

Version 4, im Mai 2023



Gelände des Friedrich-Schiller-Gymnasiums mit zahlreichen Photovoltaik-Anlagen, dem geplanten Laborgebäude (rot), dem Wasserstoffspeicher (blau) und Fahrradständern mit Ladeboxen (grau). Luftbild: Werner Kuhnle

Die Projektidee

Geboren aus einer Initiative der Stadtverwaltung und einer Gruppe Bürgerinnen und Bürger arbeitet der Solarverein Marbach am Neckar e.V. seit mehr als zwanzig Jahren intensiv für den breiten Einsatz von Photovoltaikanlagen. Der Verein kümmert sich zunehmend auch um andere für den Klimaschutz wichtige Techniken. Angesichts der ungeheuer schnellen Klimaerhitzung brauchen wir sehr rasch einen entschlossenen Umbau der Energieversorgung. Wir brauchen Menschen, die das verstehen und dafür brennen, den Wandel voran zu bringen.

Grüner Wasserstoff gilt als einer der Schlüssel künftiger Energieversorgungssysteme und Industrieprozesse und genießt aktuell höchste politische Aufmerksamkeit. Als grün wird Wasserstoff bezeichnet, wenn er durch Elektrolyse von Wasser mit elektrischer Energie ausschließlich aus regenerativen Quellen hergestellt wird. Wasserstoff ist ein guter Energiespeicher und ein überaus vielseitiger Rohstoff für die Chemie. Mit ihm werden wir in die Lage versetzt, ohne Freisetzung von Kohlenstoffdioxid einen täglichen und jahreszeitlichen Ausgleich zwischen Überangebot und Mangel an elektrischer Energie aus Photovoltaik- und Windkraftanlagen herzustellen. Er wird eine wichtige Rolle in der Mobilität spielen. Er kann fossile Energieträger mit ihrem hohen CO₂-Ausstoß in industriellen Prozessen ersetzen, vor allem in der Zement- und Stahlherstellung und der Produktion synthetischer Kraftstoffe.

Ohne die Qualifizierung und Kompetenz vieler junger Menschen wird das nicht umsetzbar sein. Wir haben daher ein außergewöhnliches Bildungsprojekt rund um Grünen Wasserstoff gestartet:

Das Wasserstoff-Bildungs-Labor

Marbach ist Standort des größten deutschen Gymnasiums. Das Friedrich-Schiller-Gymnasium war Preisträger des Deutschen Schulpreises 2007, Sieger im Jugend Technik Preis 2017 und es gewann den Schulpreis in Silber beim Bundeswettbewerb Informatik 2017. Seit 2018 darf es den Abschluss International Baccalaureate vergeben.

Der Solarverein hat in enger Zusammenarbeit mit der Schule und der Stadt Marbach auf dem Schulcampus den Aufbau einer öffentlich gut sichtbaren Anlage zur Erzeugung von Wasserstoff (Elektrolyseur), seiner Speicherung und der Rückverstromung (Brennstoffzelle) begonnen. Es werden handelsübliche Komponenten genutzt, wie sie zunehmend in kleineren Gebäuden und Gewerbebetrieben eingesetzt werden. Die Energie für den Elektrolyseur wird von Photovoltaik-Anlagen geliefert. Die von den Solarmodulen und von der Brennstoffzelle gelieferte elektrische Energie wird in ein Insel-Drehstromnetz eingespeist, an dem Experimente möglich sind. Als praktische Nutzenanwendung werden Ladestationen für Elektrofahrzeuge versorgt, wie zum Beispiel für Pedelecs auf benachbarten Fahrradabstellplätzen. Für die Sammlung und Verarbeitung der Prozessdaten werden moderne IT-Lösungen aus den Bereichen Industrie 4.0 und Speicherung in der Cloud eingesetzt. Vorgesehen ist in einer späteren Ausbaustufe die Entwicklung eines „Digitalen Zwilling“. Die Anlage soll für Arbeitsgruppen von außen, insbesondere auch aus Ausbildungsbetrieben, zugänglich gemacht werden.

Schwerpunkt unseres Projektes ist die Entwicklung und Erstellung von Lehr- und Lernunterlagen für alle Altersstufen rund um das lokale Energieversorgungssystem mit Grünem Wasserstoff im „Wasserstoff-Bildungs-Labor“. Wir sehen moderne Energiesysteme mit ihren Bezügen zur Klimaentwicklung als Querschnittsthema für alle Schülerinnen und Schüler und alle Altersstufen. Beginnend mit dem Friedrich-Schiller-Gymnasium wollen wir nach und nach für alle Schularten Bildungsimpulse zu Energieversorgungssystemen mit Grünem Wasserstoff auf dem jeweiligen Kompetenzniveau erarbeiten. Wir wollen Technikmündigkeit und Techniksozialisation fördern und Interesse für eine entsprechende Wahl der weiterführenden Bildungseinrichtung oder eines einschlägigen Berufes wecken. Die Zusagen der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg und der Hochschule Esslingen für die Betreuung geeigneter studentischer Abschlussarbeiten liegen vor. Wir werden auch eng mit betrieblichen Ausbildungsbereichen kooperieren.

Am Friedrich-Schiller-Gymnasium finden Gespräche mit den Fachbereichsleiterinnen und Fachbereichsleitern von Fächern, die am Projekt beteiligt sind, seit November 2020 regelmäßig statt. Der Schulleiter Dr. Volker Müller und Marbachs Bürgermeister Jan Trost begrüßen das Projekt und sie haben ihre Unterstützung zugesichert. Alle Fraktionen des Gemeinderates haben das Vorhaben ausdrücklich gut geheißen.

Die Kosten des Projektes werden nach aktueller Schätzung bei 300.000 Euro liegen, wovon der Solarverein ein knappes Drittel selbst aufbringt. Der Verein der Freunde des Gymnasiums beteiligt sich mit 50.000 Euro. Zahlreiche Firmen und Stiftungen tragen mit teilweise erheblichen Beträgen bei. Über die von der Kreissparkasse gesponserte Crowd-Funding-Plattform WirWunder gibt es auch viel private Unterstützung.

Solarverein Marbach e.V.
Hans Martin Gündner, Prof. Dr.-Ing., Vorsitzender
Wartbergweg 1, 71672 Marbach, Telefon 07144 97245
www.solarverein-marbach.de
vorsitz@solarverein-marbach.de

Die Schulleitung des FSG

Ein Glücksfall für das FSG!

Für die Schulleitung des Friedrich-Schiller-Gymnasiums ist die Initiative des Solarvereins ein Glücksfall: Ein zukunftsweisendes Kooperationsprojekt, das neue Dimensionen eröffnet, um unsere Schüler*innen an nachhaltige Energiegewinnung und -versorgung heranzuführen, indem es diese in eindrücklicher Form konkret macht. Gleichzeitig ermöglicht dieses einmalige Projekt auch eine produktive Vernetzung mit weiteren schulischen und außerschulischen Partnern der Forschung und der Wirtschaft, die nicht nur unserer Unterrichtsarbeit neue Impulse verleiht, sondern unseren Schüler*innen einen vertieften Einblick in die Entwicklungsaufgaben und –ansätze im Bereich des notwendigen Umbaus der Energieversorgung ermöglicht. Die Sensibilisierung der jungen Menschen für diese Mammutaufgabe der heutigen Zeit ist zentral, um sie zu aktivieren und zu befähigen, an der Bewältigung teilzuhaben, ob durch ihre Studien- und Berufswahl oder durch aufgeklärtes Verhalten im Alltag. Aus diesen Gründen sind wir uns sicher, dass das Anlagenprojekt dem FSG in seiner Rolle als Motor der Profil- und Unterrichtsentwicklung im Land neuen – und nachhaltigen – Treibstoff verleihen und weit über unsere Schule und das Bildungszentrum in Marbach hinaus neue Perspektiven für zukunftsweisende Bildung öffnen wird. Daher danken wir dem Solarverein Marbach für sein Leuchtturmprojekt und freuen uns über die finanzielle Unterstützung für das Vorhaben des Vereins hinaus auf neue Kontakte und Bildungspartnerschaften.

Die Naturwissenschaften am FSG

Ein wichtiger Bildungs- und Erziehungsauftrag an den allgemeinbildenden Schulen ist die Erziehung zur Nachhaltigkeit, was beispielsweise in der Leitperspektive “Bildung für nachhaltige Entwicklung” zum Ausdruck kommt. Nachhaltige Energiegewinnung und -speicherung ist hierbei eines der Super-Themen unserer Generation. Es ist wichtig, den Schüler*innen gerade im MINT-Bereich die naturwissenschaftlichen Grundlagen für die Energieversorgung der Zukunft zu liefern, aber auch eine solche nachhaltige Energieversorgung für unsere Schüler*innen konkret “begreifbar” zu machen.

Das FSG Marbach nimmt durch ständige Unterrichtsentwicklung schon seit vielen Jahren im MINT-Bereich eine Vorreiterrolle im Land ein. So bietet das FSG den Schüler*innen im MINT-Bereich eine große Auswahlmöglichkeit an Fächerkombinationen und Schwerpunkten: Das Fach Naturwissenschaft und Technik kann am FSG den interessierten Schüler*innen bereits ab Klasse 6 als Profilmfach angeboten werden, für angehende Erfinder*innen gibt es die Tüftler-AG, als Pilotschule für die Kursstufe NwT konnten wir als eines von 5 Gymnasien im Jahr 2020 das erste Abitur in Naturwissenschaft und Technik anbieten, im Seminarkurs Internet of Things werden die Grundlagen der vernetzten Welt vermittelt usw. So bietet das FSG ein durchgehendes Konzept in den Naturwissenschaften von Naturphänomene in Klasse 5 bis zum Abitur. Auch beim Thema der nachhaltigen Energieversorgung versucht das FSG im naturwissenschaftlichen Bereich Maßstäbe zu setzen. Beispielsweise entwickeln unsere Schüler*innen in Klasse 10 im Modell eine mobile Solaranlage, die sich automatisch nach dem Sonnenstand ausrichtet und untersuchen deren Effizienz oder sie entwickeln eine Windkraftanlage, mit der sie eine Pumpe betreiben, und optimieren deren Wirkungsgrad. Nun möchte das FSG mit der Wasserstoff-Technologie noch einen Schritt weitergehen.

Die Wasserstoff-Technologie soll anhand der Anlage im FSG in mehreren Klassenstufen des MINT Bereichs von verschiedenen Blickrichtungen betrachtet werden. Das Thema Energie nimmt im naturwissenschaftlichen Curriculum des FSG einen zentralen Stellenwert ein und wird bereits in der Unterstufe im Fach BNT (Biologie, Naturphänome und Technik) unterrichtet. Die Schüler*innen lernen verschiedene Energieträger kennen und erarbeiten die grundlegenden Zusammenhänge, indem sie mit Flussdiagrammen die Energieströme darstellen. In diesem Kontext wird die Energiespeicherung thematisiert. Wenn Schüler*innen Dinge "begreifen" und reale Anwendungen vor sich zu haben, führt dies zu einem direkteren Zugang und einem tieferen Verständnis der Thematik. Der Wasserstoff Speicher samt Elektrolyse und Brennstoffzelle wird gewinnbringend sein und den Zugang zu Energie und Stoffströmen in einem System verdeutlichen.

Anhand der geplanten Wasserstoffanlage können sehr gut auch komplexe und eigentlich sehr abstrakte Zusammenhänge aus der Mittel- und Oberstufe aufgegriffen und veranschaulicht werden. Dies betrifft beispielsweise die Themen Stoffe, Stoffeigenschaften, Redoxreaktionen, Elektrizitätslehre, Stromnetze, Wirkungsgrad, erneuerbare Energien, Steuern und Regeln, Datenkommunikation, IT - Lösungen, Nachhaltigkeit und Technikethik - also viele sehr zukunftsgerichtete Themen. So wird das Wasserstoff-System ein zentraler Anker, um die Bedeutung und die Realisierbarkeit der Wasserstoff-Technologie zu zeigen.

Das FSG Marbach möchte den nächsten Generationen zeigen, dass ein CO₂-neutrales System bereits heute realisiert und genutzt werden kann. Die Präsenz in unmittelbarer Nähe und die direkte Nutzbarkeit führen zu einem deutlich eindrücklichen Erleben der zukunftssträchtigen Technologie.

Wir bitten Sie, dieses Projekt als Förderer zu unterstützen.

Dr. Volker Müller, Oberstudiendirektor
Schulleiter

Interesse der Stadt Marbach an dem Wasserstoffprojekt des Solarvereins Marbach

Die Stadt Marbach legt schon seit vielen Jahren großen Wert auf Nachhaltigkeit und Klimaschutz. Daher sind die meisten öffentlichen Gebäude mit Solaranlagen bestückt, und sie verfügen über einen sehr hohen Energiestandard über der aktuell gültigen EnEV (Energie-Einspar-Verordnung). Auch die vielfältige Schullandschaft genießt in Marbach einen hohen Stellenwert. Besonders das Friedrich-Schiller-Gymnasium mit seinen rund 2.600 Schülerinnen und Schülern und einem Einzugsgebiet über nahezu den halben Landkreis Ludwigsburg hat eine große Strahlkraft in Marbach. Deshalb ist es für die Stadt Marbach sehr wichtig, Kinder und Jugendliche frühzeitig an Zukunftstechnologien heranzuführen und dafür zu begeistern. Denn wenn sich junge Menschen schon früh für Technik und Nachhaltigkeit interessieren, wird dies auch unseren Firmen und unserer Wirtschaft zugutekommen. Deshalb steht die Stadt Marbach voll hinter dem Wasserstoffprojekt des Solarvereins Marbach. Sie wird den Platz für für das Labor zur Verfügung stellen und die nötigen Bauplanungen begleiten. Daher gilt auch meine Bitte an Sie: Unterstützen Sie dieses im Landkreis Ludwigsburg einzigartige pädagogische Zukunftsprojekt mit einer großzügigen Spende, um unsere Kinder und Jugendlichen im technischen Bereich fit für die Zukunft zu machen.

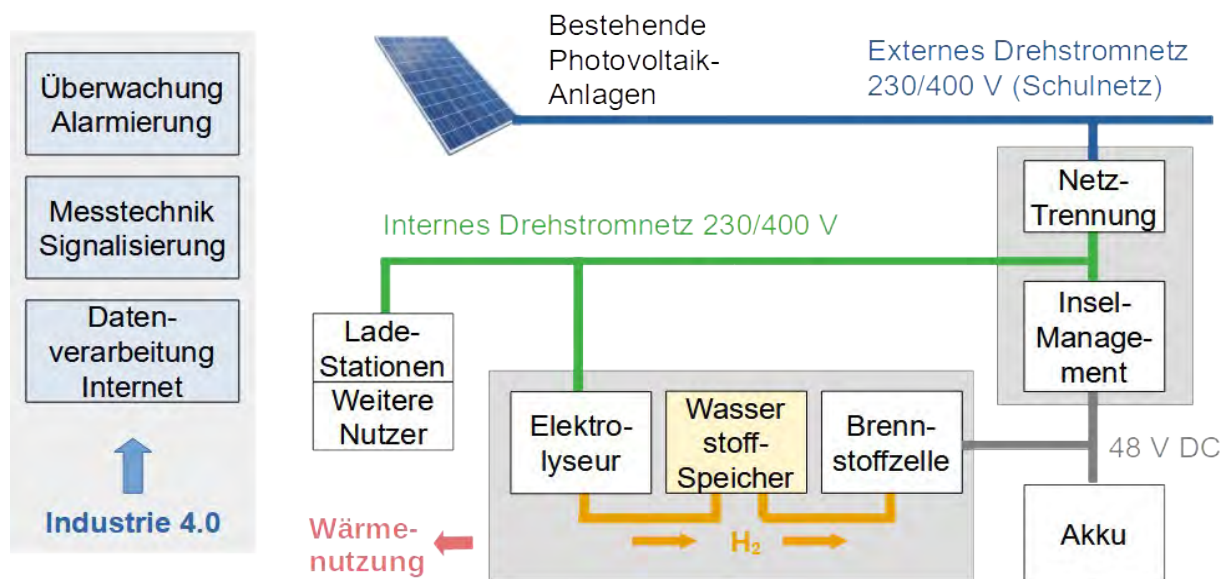
Jan Trost
Bürgermeister

ANHÄNGE

- Technisches Konzept
- Mittelbedarf
- Vorläufige Zeitplanung
- Personen und Kompetenzen

Das technische Konzept

Die nachfolgende Skizze ist stark vereinfacht. Nicht dargestellt sind insbesondere die Wandler für den Anschluss der Solarmodule an das Schulnetz. Ebenfalls nicht gezeigt sind Ventile, Schaltanlagen, Sensoren und Messgeräte, Wasserversorgung, Lüftungseinrichtungen etc.



- Der Verein verfügt auf den Schulgebäuden über mehrere Photovoltaik-Anlagen. Wegen der zum Teil großen räumlichen Entfernung sind sie nicht über eigene Leitungen, sondern über das Schulnetz („Externes Drehstromnetz“) mit dem Wasserstoff-Bildungs-Labor verbunden. Das Externe Netz ist im Besitz der Stadt, es sind daher keine Durchleitungsgebühren zu bezahlen.
- Für die Wasserstoff-Erzeugung (Elektrolyseur), seine Speicherung (externer Drucktank) und die Rückverstromung (Brennstoffzelle) werden kommerziell erhältliche, komplett fertig montierte und zertifizierte Module eingesetzt. Zur Instandhaltung wird ein Wartungsvertrag abgeschlossen. Die baulichen Vorkehrungen folgen den einschlägigen Regelungen für den Umgang mit Wasserstoff. Sicherheitsrisiken können ausgeschlossen werden.
- Das Inselnetz („Internes Drehstromnetz“) ist vom Schulnetz abtrennbar, um einen autonomen Betrieb (Inselbetrieb) der Anlage zu ermöglichen und um Experimente zuzulassen, zum Beispiel zur Netzstabilität unter wechselnden Lastbedingungen.
- Die Akkumulatoreinheit („Akku“) wird als Zwischenspeicher gebraucht, um im Inselbetrieb die Bilanz zwischen der Energie-Bereitstellung aus den Solaranlagen sowie der Brennstoffzelle und dem Energie-Bedarf des Elektrolyseurs und aller Nutzer auszugleichen. Der Akku stellt insbesondere die Versorgung der Ladestationen sicher, wenn deren Bedarf durch die Solaranlagen und/oder die Brennstoffzelle nicht gedeckt wird. Der Block „Inselmanagement“ übernimmt auch die Aufgaben der Netztrennung und der Regelung von Spannung und Frequenz des Internen Netzes.

- Energetische Kenndaten:**

Akku	Spannung 48 V, Kapazität ca. 20 kWh, Abgabeleistung ca. 10 kW
Elektrolyseur	Leistungsaufnahme 2,4 kW, H ₂ -Erzeugungsrate 45 Gramm pro Stunde, 45 g H ₂ speichern eine Energiemenge von 1,5 kWh (unterer Heizwert, u.H.), Weitere gleichartige Module können zugefügt werden. Mindestens 40 % der eingesetzten elektrischen Energie gehen bei der Elektrolyse in Wärmeenergie über. Die Abwärme wird für die Brauchwassererwärmung genutzt.
H ₂ -Speicher	850 Liter, 35 bar, H ₂ -Speicherkapazität 2,7 kg entsprechend 90 kWh (u.H.)
Brennstoffzelle	Leistungsabgabe 1,2 kW, H ₂ -Verbrauch 60 Gramm pro Stunde, entsprechend einer Energiemenge von 2 kWh (u.H.). Weitere gleichartige Module können zugefügt werden. Mindestens 40 % der eingesetzten Energie des Wasserstoffs gehen im Betrieb der Brennstoffzelle in Wärmeenergie über.
- Die Komponenten, Sensoren und Aktuatoren werden über echtzeitfähige Bussysteme vernetzt. Prozess-Visualisierungen und die Versuchssteuerungen sind am Ort und über Internet möglich.
- Die technischen Geräte werden in einem Laborhaus der Größe von etwa 8 Meter auf 3 Meter untergebracht. Dort wird auch Platz sein für Arbeitsgruppen bis etwa 10 Personen. Der Bau verfügt über alle notwendigen Sicherheitseinrichtungen für den Wasserstoffbetrieb. Er wird im nördlichen Teil des Schulcampus auch für die Öffentlichkeit gut sichtbar platziert und über ein großes Fenster einsehbar sein. Das Projekt wird über Schautafeln erläutert.
- Neben dem Laborhaus wird innerhalb einer überdachten Umzäunung der Wasserstoffspeicher (2 m hoch, 1 m Durchmesser) stehen. Die Stadt Marbach beabsichtigt, entlang des weiterführenden Weges einen überdachten Fahrradstellplatz zu errichten mit Boxen für (Pedelec-) Laderäte, die aus dem Inselnetz gespeist werden können.



Skizze des Laborhauses

Mittelbedarf

Die angegebenen Kosten beruhen vorwiegend auf Angeboten, Telefonauskünften und Schätzungen aus dem Jahr 2021, nach oben oben korrigiert um 15 % für Kostensteigerungen und Inflation.

Alle Planungs- und Steuerungsaufgaben werden ehrenamtlich vom Projektteam erfüllt; es fallen keine Personalkosten an.

Kostenschätzung Stand März 2023, inklusiv MWSt

Grundstücksüberlassung, Baugenehmigung, Leitungsbau	15.000
Gebäude, Klimatisierung, Belüftung	95.000
Einhausung Wasserstofftank	10.000
Kernelemente Wasserstoff (Elektrolyseur, Speicher, Brennstoffzelle)	60.000
Batterie (Akku), Inselmanagement, Schaltschrank, Verkabelung	23.000
Prüfungen und Genehmigungen	6.000
Sensorik, Rechner, Server, Bildschirm	25.000
Software für Steuerung, Überwachung, Darstellung	23.000
Möblierung, Schilder, Drucksachen, Resiekosten, Diverses	12.000
Unvorhergesehenes, Kostensteigerungen	31.000

Gesamtkosten **300.000**

Kostendeckung Stand Mai 2023

Eigenmittel des Vereins	80.000
Beitrag des Vereins der Freunde des Friedrich-Schiller-Gymnasiums	50.000
Zugesagte Beiträge von Stiftungen und Unternehmen	75.000
Berthold Leibinger Stiftung, EnBW, Eva Mayr-Stihl-Stiftung	
Frizlen GmbH, Hainbuch Spannende Technik, Josef Wund Stiftung,	
Müller - Die Lila Logistik, Stiftung der Kreissparkasse Ludwigsburg	
Crowd-Funding Aktion bei WirWunder.de, andere Spenden	5.000

Verbleibender Bedarf **90.000**

Vorläufige Zeitplanung

25.04.2023	Umsetzungsbeschluss der Mitgliederversammlung des Sloarvereins
Bis 05.2023	Vertiefung und Konkretisierung des technischen Konzeptes
	Erstellung des Lastenheftes
	Sicherstellung der Finanzierung
	Erstellung eines Pflichtenheftes
05.2023 bis 07.2023	Angebots- und Auftragsphase für Lieferungen und Dienstleistungen,
	Bauplanung im Detail
08.2023 bis 03.2024	Bauseitige Vorbereitung am Laborstandort
	Bau des Laborgebäudes, Lieferung der Kernkomponenten
Wintersemester 2023	Erste Masterarbeit an der PH Ludwigsburg zum Didaktikkonzept
Ab 04.2024	Integration der Hardware und Software, Visualisierung,
	Erprobung, Feinabgleich der verschiedenen Betriebsprozesse
Mitte 2024	Laboreinweihung
Ab 09.2024	Beginn der Einführung in den NWT-Unterricht am Gymnasium,
	Projektdarstellung für die Öffentlichkeit
2025	Ausweitung der Lehr-/Lernkonzepte auf andere Schulformen,
	Beginn regelmäßiger Besucherführungen,
	Evaluation der Einführungsphase in den Unterricht,
	Veröffentlichung

Am Projekt beteiligte Personen und ihre Kompetenzen

Pädagogische Hochschule Ludwigsburg

Matthias Laukenmann, Prof. Dr. rer. nat.

Leiter der Abteilung Physik und ihre Didaktik der Fakultät II, Kultur- und Naturwissenschaften

Friedrich-Schiller-Gymnasium Marbach

Martin Merkle, Studiendirektor, Fachberater für Physik und für Naturwissenschaft und Technik am ZSL, Zentrum für Schulentwicklung und Lehrerbildung Baden-Württemberg

Martin Rumold, Studienrat, Fachvorsitzender Physik

Thomas Schölkopf, Dr. rer. nat., Studiendirektor,
Referat Naturwissenschaften in der Schulleitung

Frank Trittler, Studiendirektor, Fachberater für Naturwissenschaft und Technik am ZSL

Solarverein Marbach

Hans Martin Gündner, Diplom-Physiker, Prof. Dr.-Ing., i.R.

Informationstechnik, Entwicklung elektronischer Geräte, Qualitätsmanagement, Didaktik

Daniel Hofsäß, selbstständiger Unternehmer

Recycling-Technik, unter anderem für Photovoltaikmodule und Akkumulatoren

Andreas Köpf, Diplom-Physiker, Dr. rer. nat., i.R., Projektleitung

Kristopher Mück, Zertifizierter Energieberater

Wolfgang Nüssle, Geschäftsführer CORONA Ingenieurgesellschaft für Systemtechnik, Beilstein
Software-Entwicklung für Embedded Systems

Günter Offermann, Diplom-Physiker, Mathematik- und Physiklehrer, Oberstudiendirektor i.R.
Physik und ihre Didaktik

Stefan Pelz, Diplom-Informatiker, Softwareentwicklung für Embedded Systems, Projektleitung

Bernd Petruzzelli, Diplom-Ingenieur Maschinenbau

Geschäftsführer E3 Energie Effizienz Experten, Schwäbisch Hall

Udo Seier, Diplom-Ingenieur Elektrotechnik, i.R.

Nachrichtentechnik, Requirement Engineering

Lothar Sondermeyer, Vermessungstechniker, i.R., Finanzen

Bernd Waser, Diplom-Ingenieur Elektrotechnik, Automatisierungstechnik, Projektmanagement

