

# Entwicklung eines dynamischen Simulationsmodells zur Optimierung von wärmegekoppelten Wasserstoffkonzepten für die klimaneutrale Quartiersversorgung

Masterarbeit von Heiner Steinacker an der Universität Stuttgart (IGTE), 17.07.2022

Betreuung: Dr. Harald Drück<sup>1</sup>, Dr. Christian Kley<sup>2</sup>, Simon Marx, M.Sc.<sup>2</sup>

Prüfer: Prof. Dr. Konstantinos Stergiaropoulos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung

<sup>2</sup>Steinbeis Innovationszentrum energieplus, Stuttgart (Leitung: Prof. Dr. M. Norbert Fisch)

## Kurzfassung

Der für eine zukünftig klimaneutrale Energieversorgung notwendige Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromsektor erfordert ein hohes Maß an Flexibilität bei den Nutzenden von elektrischer Energie. Neuartige wasserstoffbasierte Power-to-Gas-and-Heat-Systeme (PtG&H) mit Elektrolyseuren, Hochtemperatur-Wärmepumpen und Langzeitwärmespeichern (LZWSP) können bei netzdienlichem Betrieb einen wichtigen Beitrag zu dieser Flexibilität leisten. Durch die Verwendung der Abwärme des Elektrolyseprozesses wird außerdem ein hoher Systemnutzungsgrad erzielt. Die Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und je nach Wasserstoffverwertung auch des Mobilitäts- und Industriesektors kann neben einem Beitrag zu einer treibhausgasneutralen Wärmeversorgung von urbanen Neubau- und Bestandsquartieren auch die Dekarbonisierung anderer Sektoren ermöglichen.

Die vorgestellte Masterarbeit wurde beim Steinbeis-Innovationszentrum energieplus (*SIZ energieplus*) erstellt, wo intensiv an der praktischen Umsetzung wasserstoffbasierter PtG&H-Konzepte geforscht wird. Die Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojekts *H2-Quartiere*, worin die Entwicklung von insgesamt sechs klimaneutralen Stadtquartieren im süddeutschen Raum gebündelt ist (Förderkennzeichen 03EN3047A). In jedem der sechs Projekte stellt sich in der aktuellen Konzeptphase die Frage, unter welchen energetischen, ökologischen, ökonomischen und technischen Randbedingungen ein wasserstoffbasiertes PtG&H-Konzept unter den standortspezifischen Gegebenheiten umgesetzt werden kann und ob bzw. wie die Integration eines LZWSP sinnvoll ist. In der im Rahmen der Masterarbeit durchgeführten Recherche konnte kein bestehendes Simulationswerkzeug gefunden werden, das die zuvor definierten Anforderungen ohne weitreichende Anpassungen erfüllt. Speziell die Anforderung nach der Abbildung unterschiedlicher Regelstrategien, die generelle Möglichkeit der Simulation eines Elektrolyseurs mit Abwärmenutzung und eines LZWSP in Kombination mit einer ausführlichen Kosten- und Treibhausgasbilanz sowie automatisiert durchführbaren Parametervariationen bei einer angemessenen Simulationsdauer führten zum Ausschluss aller untersuchten Simulationsmodelle.

Darum wurde im Rahmen dieser Masterarbeit das neue Simulationsmodell SimH2Q entwickelt. Es ist in Python implementiert und es ermöglicht die Beantwortung der oben genannten Fragestellungen in der frühen Konzeptphase. SimH2Q kann verschiedene wasserstoffbasierte PtG&H-Systeme simulieren und sinnvolle Anlagendimensionierung hinsichtlich unterschiedlicher Zielgrößen (z.B. Kosten, Treibhausgasbilanz, Nutzungsgrad) mittels einer Blackboxoptimierung oder durch gezielte Parametervariationen ermitteln. Neben Energiebilanzen werden dabei auch Treibhausgasemissionsbilanzen sowie Kostenbilanzen nach VDI 2067 berechnet. Die Bedienung erfolgt über eine in neun Registerblätter aufgeteilte Excel-Benutzeroberfläche und wird erleichtert durch die Bereitstellung von Standard-Eingabedaten. Dafür sind für alle Komponenten Investitionskostendegressionskurven in Abhängigkeit der Anlagengrößen, jährlich anpassbare Kostenänderungsfaktoren, Anlagenlebensdauern sowie allgemeine

Preissteigerungs- und Abzinsungsraten und eine Berücksichtigung von Investitionsförderungen hinterlegt. Für die Berechnung der Treibhausgasbilanz kann auf ein vorgegebenes moderates oder ein progressives Szenario für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen bzw. –gutschriften für verschiedenen Energieträger in den nächsten 50 Jahren zurückgegriffen werden.

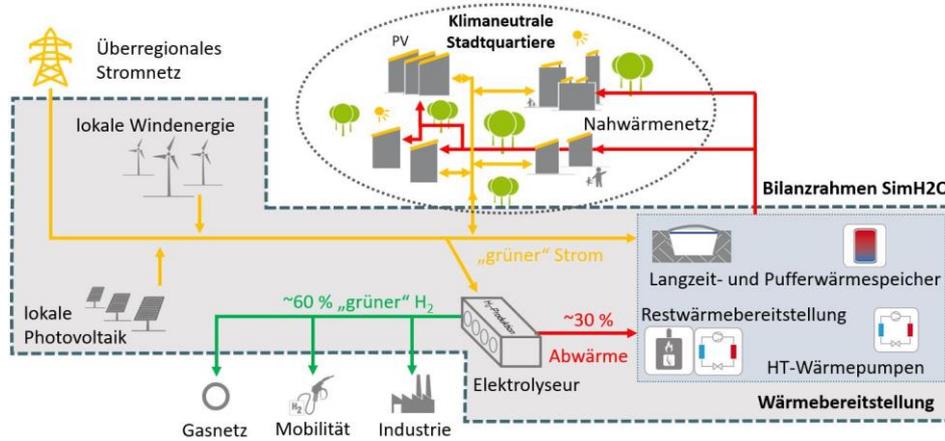


Abbildung 1: Bilanzrahmen von SimH2Q

Der Bilanzrahmen von SimH2Q ist in der nebenstehenden Grafik dargestellt und umfasst neben lokalen PV- und Windkraftanlagen einen Elektrolyseur sowie verschiedene Nutzungsmöglichkeiten von dessen Abwärme.

Konkret wurden im Rahmen der Masterarbeit vier Anlagenvarianten von PtG&H-Konzepten in Gesprächen mit Experten sowie Wärmepumpen- und Elektrolyse-Herstellern ausgearbeitet, die sich im Wesentlichen anhand der Position der Wärmepumpe zwischen Elektrolyseur und Fernwärmenetz unterscheiden. Somit lässt sich die Integration unterschiedlicher Temperaturniveaus von Elektrolyse-Technologien (AEM, AEL, PEM) und LZWSP in Wärmenetze mit verschiedenen Vorlauftemperaturen (Bestand, Neubau) abbilden. Beispielhaft ist rechts eine Systemvariante mit einem LZWSP auf hohem Temperaturniveau und einem Wärmenetz in einem Neubau-Quartier mit einer Nenn-Vorlauftemperatur von beispielsweise 50 °C oder 75 °C, je nach verwendeter Elektrolyse-Technologie, dargestellt.

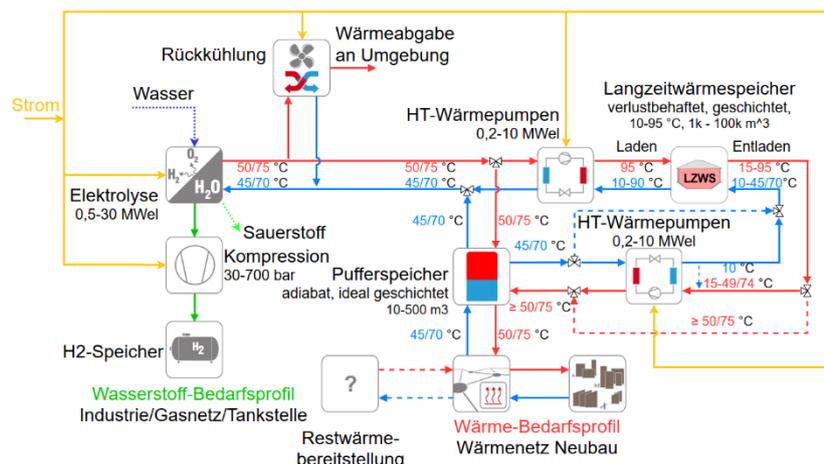


Abbildung 2: Eine von vier Systemvarianten in SimH2Q mit beispielhaften Temperaturen und den in den Standarddaten abgedeckten Anlagendimensionen

Die Basis für die Berechnung von Energiesystemen mit SimH2Q beruht auf der Berechnung von Energiemengen in jedem Zeitschritt. Um einerseits das Modell selbst und andererseits die Eingaben sowie die Berechnungszeit möglichst einfach beziehungsweise kurz zu halten, wurde bewusst auf eine thermische Simulation detaillierter Modelle verzichtet. Während das Modell des Elektrolyseurs und das der Wärmepumpen auf empirischen quasi-statischen equation-fit Modellen beruhen, ist für den LZWSP ein 1D-konvektiv-diffusives Vielschichtmodell implementiert. Letzterer kann als konischer Erdbecken- oder als zylindrischer Tankspeicher modelliert werden. Für eine möglichst hohe Berechnungsgeschwindigkeit ist der Kurzzeitwärmepufferspeicher vereinfachend als adiabates Zweischichtmodell mit einer idealen Schichtung abgebildet. Der Energieaufwand für die Wasserstoffkompression wird konservativ unter der Annahme idealer Gase berechnet. Für die Simulation von Photovoltaikerträgen wurde auf die Python-Bibliothek *pvl* und für Windenergie auf *windpowerlib* zurückgegriffen. Die Simulation kann mit variabler Zeitschrittweite durchgeführt werden, da Profile automatisch umgerechnet werden. Standardmäßig erfolgt die Simulation mit einer Zeitschrittweite von 15 Minuten. Da-

