

Konzepte für die nächste Generation von technischen Regulierungen im Bereich Gebäude und Energie

Energiewende und Technische Regulierung EnTeR – Schlussbericht Phase 1

Die Rolle von technischer Regulierung in der Transformation des Gebäudeparks und deren Integration in das zukünftige Energiesystem (EnTeR)

Autoren

Projektleitung:

Matthias Sulzer¹

Kristina Orehounig¹

Forschungsteam (alphabetische Reihenfolge):

Viktor Carp¹

Reto Gadola³

Christof Knoeri²

Julien Marquant¹

Georgios Mavromatidis¹

Stefan Menzel³

Portia Murray¹

Christina Nakhle²

Mathias Niffeler³

Marius Schwarz²

¹Empa

Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology
Überlandstrasse 129
8600 Dübendorf

²ETH Zürich

Group for Sustainability & Technology
Weinbergstrasse 56
8092 Zürich

³Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Technikumstrasse 21
6048 Horw

Das Projekt "Die Rolle von technischer Regulierung in der Transformation des Gebäudeparks und deren Integration in das zukünftige Energiesystem" wurde in zwei Phasen gegliedert. Dieser Schlussbericht fasst die erste Phase, welche vier Arbeitspakete enthält, zusammen. Die im Schlussbericht eher allgemein gehaltenen Aussagen sind in den Teilberichten im Detail dokumentiert. Die erste Phase wurde im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms „Energiewende“ (NFP 70) des Schweizerischen Nationalfonds (SNF) durchgeführt und durch die Konferenz Kantonaler Energiedirektoren (EnDK) mitfinanziert. Die Phase 2, welche Erkenntnisse und Resultate aus der ersten Phase nutzt und eine spezifische technische Regulierung für den Gebäudebereich ausarbeitet, ist nicht Bestandteil dieses Projekts.

Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt EnTeR untersucht die Wirkung von technischen Regulierungen in der Transformation des Gebäudeparks und deren Integration in das zukünftige Energiesystem. (abgekürzt TER). Darauf basierend werden Vorschläge für zukünftige Stellschrauben in der Energiegesetzgebung hergeleitet. Forschungsobjekte sind verpflichtende Energievorschriften im Gebäudebereich. Die Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEN) werden in dieser Arbeit beispielhaft verwendet, eine Analyse und Beurteilung der aktuellen MuKEN ist nicht Bestandteil dieses Forschungsprojekts.

Die Hauptaufgabe in dieser ersten von zwei Projektphasen bestand darin, wirkungsvolle Massnahmen zu identifizieren, mit welchen die Akteure (Hauseigentümer, Bauherren, Investoren, Nutzer, Ausführende, etc.) mittels TER gelenkt werden können: «Was soll reguliert werden?». Damit wird die Voraussetzung geschaffen, effektive und effiziente Vorschriften und deren Vollzug in einer zweiten, noch folgenden Projektphase zu formulieren: «Wie soll reguliert werden?» Die zweite Phase soll auf die Rechtssetzung, spezifische Inhalte/Grenzwerte und den Vollzug fokussieren.

Die internationale Analyse zeigte, dass TER in ihrer derzeitigen Ausgestaltung trotz ihrer bisherigen Erfolge bei der Effizienzsteigerung im Gebäudesektor an Grenzen stossen. Vor allem wenn es um die Dekarbonisierung des Gebäudesektors geht. Die Literatur listet hierfür folgende fünf Schwachstellen auf: (i) Weitere Steigerung der Energieeffizienz, (ii) Berücksichtigung der «Grauen Energie», (iii) Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien, (iv) Schliessen des «Performance Gaps» und (v) Beschleunigung der Sanierungsrate.

Die MuKEN:2014 nimmt bereits heute eine Schlüsselrolle bei der Transformation des Schweizer Gebäudeparks hin zu einem nahezu CO_{2,eq}-freien Sektor ein. Sie ist eine zeitgemässe Regulierung und nimmt darüber hinaus in gewissen Bereichen eine Vorreiterrolle ein, indem sie zum Beispiel die Elektrizitätserzeugung vor Ort sowie erneuerbare Energien zur Wärmebereitstellung vorschreibt. Die Wirkanalyse bestätigt jedoch, dass auch bei einer kantonalückenlosen Umsetzung der MuKEN:2014 das CO_{2,eq}-Ziel der Energiestrategie 2050 (ES2050) um rund 30% verfehlt wird. Um das CO_{2,eq}-Ziel zu erreichen, müssen zusätzliche bzw. restriktivere Vorschriften vor allem für den Austausch von Öl- und Gasheizungen in eine neue TER aufgenommen werden. Die geltenden Anforderungen der MuKEN:2014 an die Gebäudehülle für bestehende und zukünftige Gebäude werden in dieser Forschungsarbeit als ausreichend beurteilt.

Durch technisch-ökonomische Optimierungen konnten Lösungen für den Gebäudepark Schweiz aufgezeigt werden, mit welchen spezifische CO_{2,eq}-Emissionen unter 10 kg_{CO_{2,eq}}/m² erreicht werden – typischerweise bei CO_{2,eq}-Vermeidungskosten von 200–400 CHF/t_{CO_{2,eq}} gegenüber kostenoptimierten Lösungen. Die technisch-ökonomisch optimalen Lösungen zeichnen sich durch drei Massnahmenstrategien auf Gebäudeebene aus: (i) die Gebäudehülle in Bezug auf die Energieeffizienz teilweise verbessern, (ii) weitestgehender Ersatz von Öl- und Gasheizungen durch erneuerbare Heizsysteme und (iii) Einsatz von Photovoltaik und in einigen Fällen die Installation elektrischer Speicher.

Weitere Ergebnisse deuten darauf hin, dass in den Städten für 50–80 % und in dichter besiedelten bzw. industrialisierten Agglomerations-Gemeinden für bis zu 50 % der Quartiere eine Quartierslösung mit thermischen Netzen sinnvoll sind. Die Investitionskosten solcher Quartierslösungen sind zwischen 20 und 25% niedriger als eigenständige Gebäudelösungen.

Durch die Skalierung der technisch-ökonomisch optimalen Lösungen auf den gesamten Gebäudepark könnten die CO_{2,eq}-Emissionen gegenüber 2015 um bis zu rund 80% reduziert werden. Dies zeigt, dass die Erreichung des ES2050-Ziels für den Gebäudepark Schweiz technisch und wirtschaftlich machbar ist.

Um ein bestmögliches regulatorisches Umfeld zu schaffen mit dem Ziel, dass sich der Gebäudepark in die gewünschte Richtung entwickelt, wurde ein TER Konzept basierend auf dem Lebenszyklus einer Immobilie entwickelt. Die Aufteilung wirkungsvoller Massnahmen in die drei Hauptphasen des Lebenszyklus einer Immobilie (Erstellung, Betrieb und Rückbau) ermöglicht es die TER auf die relevanten Akteure auszurichten:

1. Für die Erstellung (Planungs- und Bauphase) wird die TER «**Leistungsgrenze**» vorgeschlagen. Die Auswertungen der Gebäudeenergiesimulationen zeigte, dass der maximale Leistungsbedarf die Energieeffizienz eines Gebäudes unwesentlich schlechter repräsentiert wie die Beurteilung des jährlichen Energiebedarfs. Jedoch kann mit einer solchen TER der Nachweis vereinfacht und die Wirkung erweitert werden: (i) Vereinfachung: Die Berechnung der Leistung basiert ausschliesslich auf der gewählten Konstruktion sowie der Material- und Gerätewahl. Betriebliche Annahmen wie Solargewinne, Abwärme, Raumtemperaturen etc. können vernachlässigt werden. Der Vollzug kann ähnlich wie bisher mit der Überprüfung der Einhaltung eines Grenzwertes während der Planung erfolgen bzw. (einfacher) während des Baus, indem die Leistungsdaten der installierten Anlagen geprüft werden. (ii) Erweiterung: Die Umstellung des Energiesystems auf erneuerbare Energieträger ist eine Herausforderung vor allem für die Infrastrukturen Strom, Gas und Wärme und die entsprechende Leistungsbereitstellung und -verteilung. Mit einer Leistungsbegrenzung beim Gebäude kann direkt Einfluss auf die Anforderungen bei den Netz-, Reserve- und Speicherkapazitäten der Infrastrukturen genommen werden.
2. Für den Betrieb (Nutzung) wird die TER «**Energiemix**» vorgeschlagen. Der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen werden während der Nutzung eines Gebäudes massgeblich beeinflusst. Mit der vorgeschlagenen TER wird die Menge der erlaubten CO_{2,eq}-Emissionen während der Betriebsphase begrenzt. Der Nutzer kann die CO_{2,eq}-Grenzwerte einhalten indem er seinen Verbrauch reduziert, CO_{2,eq}-arme/-freie Energieprodukte wählt und/oder seine eigene Energieproduktion erhöht, indem er Photovoltaik, Wärme-Kraft-Koppelung etc. installiert.
3. Für den Rückbau (Material) wird die TER «**Materialzyklus**» vorgeschlagen. Der indirekte, ‚graue‘ Anteil des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen wird durch die verwendeten Baumaterialien verursacht. Diese nicht-betrieblichen Emissionen können bis zu 40% der gesamten Emissionen über den Lebenszyklus eines Gebäudes beitragen. Die vorgeschlagene TER soll diesen ‚grauen‘ Anteil reduzieren, indem eine Recyclinggebühr auf Baumaterialien erhoben wird. Durch das Erheben einer solchen Gebühr wird der Eigentümer motiviert, seine Materialien zurückzuführen und die Industrie baut Recyclingprozesse auf, welche in Zukunft dekarbonisiert sind (siehe TER «Energiemix»).

Die vorliegende Arbeit (Phase 1, Konzepte für technische Regulierung im Gebäudebereich) fokussierte auf die energietechnische Regulierung. Weiterführende rechtliche Instrumente, wie z.B. Raumplanung, Subventions- und Abgaberecht, haben noch keinen Eingang in diese Arbeit gefunden. Eine Abstimmung solcher weiterführenden Instrumente mit der zukünftigen TER ist zentral, um eine grösstmögliche Wirkung zu erreichen. Im Weiteren sollte auch die Ermittlung der Steuerwirkung der verschiedenen Regulierungsinstrumente untersucht und ggf. aufeinander abgestimmt werden. Damit werden ganzheitliche Voraussetzungen geschaffen, um die Ziele der ES2050 aus regulatorischer Sicht volkswirtschaftlich effizient und effektiv zu erreichen. Diese weiterführenden Themen können in der nachfolgenden Phase 2 bearbeitet werden.

Abstract

The EnTeR research project analyses the effects of technical regulations in the transformation of the building stock and its integration into the future energy system (TER). Based on this, recommendations for future energy legislation are derived. Objects of research are mandatory energy regulations in the building sector. The model regulations of the Swiss cantons in the energy sector (MuKE n) are used as examples in this work, while an analysis and assessment of the current MuKE n is not part of this research project.

The main task in this first of two project parts was to identify effective measures which can guide actors (house owners, building owners, investors, users, contractors, etc.) by means of TER to achieve CO_{2,eq} emission targets, answering the question: "What should be regulated?" The results shall act as a basis to formulate effective and efficient regulations and their enforcement in a second part of the project, which will answer the question: "How should regulations take place?" The second part will focus on legislation, specific content/limit values and enforcement.

The international analysis revealed that TER, despite its previous success in increasing the energy efficiency of the building stock, seems to be reaching its limits. Particularly when it concerns the decarbonisation of the building sector. The literature lists therefore the following five weaknesses: (i) Further increase in energy efficiency, (ii) consider "grey energy", (iii) increase the share of renewable energies, (iv) close the "performance gap", and (v) accelerate the renovation rate.

MuKE n:2014 plays a key role in the transformation of the Swiss building stock into a sector that is nearly CO_{2,eq}-free. It is a state-of-the-art regulation and, in certain parts, also a pioneer by prescribing local electricity generation and renewable energies for heat generation. However, the impact analysis confirms that even if the MuKE n:2014 is fully implemented in all cantons, the CO_{2,eq} target of the Energy Strategy 2050 (ES2050) will still be missed by approximately 30%. In order to achieve the CO_{2,eq} target, additional or more restrictive regulations, especially for the replacement of oil and gas heating systems, must be included in a new TER. The current requirements of MuKE n:2014 on the building envelope for existing and new buildings have been judged sufficiently in this research work.

Through technical and economic optimizations, it was possible to identify solutions for the Swiss building stock which achieve specific CO_{2,eq} emissions below 10 kgCO_{2,eq}/m² - typically at CO_{2,eq} avoidance costs of 200-400 CHF/tCO_{2,eq} compared to cost-optimal solutions. The technically and economically optimized solutions are characterized by three measures at building level: (i) partially improve the building envelope in terms of energy efficiency, (ii) replace oil and gas heating systems as far as possible with renewable heating systems and (iii) use photovoltaics and, in some cases, install electrical storage systems.

Further results indicate that in cities, a district solution with thermal networks would be appropriate for 50-80% and in more densely populated or industrialized agglomerations for up to 50% of the neighborhoods. The investment costs of such district solutions are between 20 and 25% lower than standalone building solutions.

By scaling the technically and economically optimal solutions to the entire building stock, CO_{2,eq} emissions could be reduced by up to 80%. This shows that it is technically and economically feasible to achieve the ES2050 target for the Swiss building stock.

In order to provide the best possible regulatory environment for the building stock to develop in the intended direction, a TER concept was developed based on life-cycle thinking. The life-cycle perspective made it possible to formulate effective measures in the three main phases (construction, operation and decommissioning) of a property. This separation allows a TER to be specifically aligned to the phase-specific relevant actors:

1. The TER «**Capacity Limit**» is proposed for the construction phase (planning and building). The evaluations of the building energy calculations showed that the maximum system capacity represent the energy efficiency of a building marginally worse than the assessment of the annual energy demand.

However, with such a TER the certification can be simplified and the impact extended: (i) Simplification: The calculation of the system capacity is based exclusively on the chosen construction and the selection of materials and equipment. Operational assumptions such as solar gains, waste heat, room temperatures etc. can be neglected. Implementation can be carried out in a similar way to the previous procedure of verifying compliance with a limit value during planning or (more simply) during construction by checking the capacity data of the installed systems. (ii) Expansion: The switch to renewable energy sources in the energy system is a particular challenge for the electricity, gas and heat infrastructures and the corresponding capacity of supply and distribution. By limiting the capacity of a building, it is possible to directly influence infrastructure requirements by reducing network and reserve capacities and increasing storage capacities.

2. For operation phase (usage), the TER «**Energy Mix**» is proposed. Energy consumption and greenhouse gas emissions are significantly influenced during the use of a building. The proposed TER limits the amount of allowed CO_{2,eq} emissions during the operating phase. In order to take into account the quality of the used energy, the caused CO_{2,eq} emissions should be assessed. The actor can comply with the CO_{2,eq} limits by reducing his consumption, choosing low CO_{2,eq} or CO_{2,eq}-free energy products and/or increasing his own energy production (e.g. photovoltaics, combined heat and power generation, etc.).
3. For the decommissioning phase (material) the TER «**Material Cycle**» is proposed. The indirect, 'grey' share of energy consumption and greenhouse gas emissions is caused by used building materials. The share of these non-operating emissions can account for up to 40% of total emissions over the life time of a building. The proposed TER aims to reduce this 'grey' share by imposing a recycling fee on building materials. By imposing such a fee on building materials the owner will be motivated to return his materials and the industry will develop recycling processes, which are fully decarbonized in the future (see TER «Energy Mix»).

The presented work (Part 1, Fundamentals) focused on energy regulations. Further policy instruments, e.g. spatial planning, subsidies and taxes, are not considered in this work. The coordination of such instruments with the future TER is essential to achieve the greatest possible impact. Furthermore, the determination of the tax effects of the various regulatory instruments should also be examined and, if necessary, coordinated. This will establish holistic conditions for achieving the objectives of the ES2050 in an economically efficient and effective manner from a regulatory point of view. These further topics can be addressed in the subsequent phase 2.

Inhalt

1	AUSGANGSLAGE UND AUFGABENSTELLUNG	8
2	EINFÜHRUNG	9
3	VORGEHEN	11
4	METHODE UND RESULTATE	12
4.1	WP1: Internationale Analyse	12
4.1.1	Innovative energietechnische Regulierungen im Gebäudebereich	13
4.1.2	Wie könnte die Schweiz von innovativen Ansätzen der TER lernen?.....	16
4.2	WP2: Wirkung auf nationaler Ebene	19
4.3	WP3: Wirkung auf Gebäude- und Quartiersebene	21
4.3.1	Wirkung auf Gebäudeebene.....	21
4.3.2	Wirkung auf Quartiersebene.....	27
4.4	WP4: Massnahmen einer neuen TER	30
4.4.1	Identifikation wirksamer Massnahmen	30
4.4.2	Herleitung von TER.....	33
4.4.3	Vergleich zur MuKE:2014.....	35
5	FAZIT	37
6	AUSBLICK	38
7	DANK	39
8	REFERENZEN	40

1 Ausgangslage und Aufgabenstellung

Energievorschriften sind heute in verschiedenen Wirtschaftssektoren ein massgeblicher Treiber zur Steigerung der Energieeffizienz und Reduktion der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen¹ – so auch in der Baubranche. Entscheidend werden jedoch die Weiterentwicklungen dieser Vorschriften sein, damit zukünftige Systeme, Konzepte und Elemente umsetzungsfähig sind. Eine solche Weiterentwicklung ebnet den Weg für die Anwendung innovativer Technologien und Konzepte aus der Forschung, z.B. aus dem NFP-70-Projekt «Wirtschaftlichkeit dezentraler Energiesysteme» (Economic assessment of multi-energy-hub systems integration at neighbourhood scale IMES-ECO) Im Weiteren sollen neue Regulationen sicherstellen, dass noch zu entwickelnde Technologien, Systeme und Konzepte auf Vorschriften treffen, welche deren Umsetzung ermöglichen und nicht behindern.

Das Forschungsprojekt EnTeR untersucht die Wirkung von technischen Regulierungen in der Transformation des Gebäudeparks und deren Integration in das zukünftige Energiesystem (TER²) und darauf basierend werden Vorschläge für zukünftige Stellschrauben in der Energiegesetzgebung hergeleitet. Als Forschungsobjekt werden verpflichtende Energievorschriften im Gebäudebereich verwendet. Ergänzende und/oder komplementäre Regulierungen und Massnahmen, wie z.B. Raumplanung, Energieplanung, Subventionen, etc., werden in dieser Arbeit nicht untersucht. Hingegen wird auf Schnittstellen zu diesen Regulierungsarten hingewiesen und es werden ggf. Synergiepotentiale erwähnt, welche die Wirkung von TER beeinflussen könnten. Die Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEN) werden in dieser Arbeit beispielhaft verwendet, eine detaillierte Analyse und Beurteilung der bestehenden MuKEN ist jedoch nicht Bestandteil dieses Forschungsprojekts.

Die übergeordnete Forschungsfrage lautet: Mit welchen Kombinationen von TER, kann die Zielerreichung der Energiestrategie 2050 (ES2050) am wirkungsvollsten und effizientesten unterstützt werden? Dabei sollen neue Methoden, Konzepte und Elemente im Bereich Energievorschriften erforscht werden, welche in zukünftigen TER Platz finden könnten. Eine Grundvoraussetzung dieser Arbeit ist, dass die Vorschläge losgelöst von bestehenden Vorschriften erarbeitet werden. Erst am Schluss dieser Arbeit wird eine Einordnung der Vorschläge in die heutigen TER (MuKEN 2014) erfolgen.

Diese Arbeit soll die Grundlage für die Ausarbeitung der nachfolgenden MuKEN:20XX bilden und umfasst die erste von zwei Projektphasen. Der erste, hier präsentierte Phase befasst sich mit dem TER Konzept und basiert auf wissenschaftlichen Fakten. Die Hauptaufgabe besteht darin, wirkungsvolle Einflussgrössen auf Energieverbrauch und $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen zu identifizieren, mit welchen die Akteure (Hauseigentümer, Bauherren, Investoren, Nutzer, Ausführende, etc.) mittels TER gelenkt werden können: «Was soll reguliert werden?». Damit wird die Voraussetzung geschaffen, effektive und effiziente Vorschriften und deren Vollzug im zweiten Teil, welcher nicht Bestandteil dieser Arbeit ist, zu formulieren: «Wie soll reguliert werden?» In der zweiten Phase können anhand der geschaffenen Grundlagen aus der ersten Phase die Diskussionen mit den Kantonen über die zukünftige MuKEN:20XX geführt, deren Rechtssetzung ausgearbeitet, spezifische Inhalte/Grenzwerte formuliert und der Vollzug definiert werden.

Im Weiteren dient diese Arbeit auch dem besseren Verständnis gegenüber Energievorschriften und deren Potential, Innovationen zu fördern. Es soll auch aufgezeigt werden, inwiefern Energievorschriften z.B. neue

¹ Äquivalente CO_2 -Emissionen ($\text{CO}_{2,\text{eq}}$) sind eine Masseinheit zur Vereinheitlichung der Klimawirkung der unterschiedlichen Treibhausgase.

² Regulierung und Vorschrift werden in dieser Arbeit als gleichbedeutende Begriffe behandelt. Eine Regulierung umfasst Gesetze und Verordnungen. In der Literatur werden energietechnischen Regulierungen im Gebäudebereich (TER) im Gebäudesektor oft als Building Energy Codes (BEC) bezeichnet. In diesem Projekt verwenden wir TER und BEC als Synonyme.

Dienstleistungsangebote unterstützen und wie Energievorschriften beitragen könnten, Lösungen zu forcieren, welche die Energieziele effizienter, schneller und kostengünstiger erreichen lassen.

2 Einführung

Der Endenergieverbrauch von Gebäuden beträgt rund 31% des weltweiten Verbrauchs und verursacht 23% der globalen energiebedingten Kohlenstoffemissionen [1]. In Industrieländern sind diese Werte noch höher. In der Schweiz tragen Gebäude durch Raumwärme, Warmwasser und Gebäudetechnik rund 37% zum Endenergieverbrauch [2] und rund 27% zu den CO_{2,eq}-Emissionen, bilanziert nach den Richtlinien der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen [3], bzw. rund 37% zu den CO_{2,eq}-Emissionen, bilanziert nach IEA [4], bei.

Der Energieverbrauch in Gebäuden ist heute also immer noch einer der Hauptverursacher für die CO_{2,eq}-Emissionen in der Schweiz. Um die Klimaziele zu erreichen, müssen Gebäude energieeffizienter werden und ihre fossilen Energiesysteme sind durch effiziente und erneuerbare Lösungen zu ersetzen. Um diesen Strategien effektiv nachzukommen sind vor allem wirtschaftliche Sanierungsmassnahmen für den Gebäudebestand zu entwickeln und umzusetzen. Wird der Gebäudepark energetisch erneuert, ist dies ein gewichtiger Beitrag zur Erreichung der Energie- und Klimaziele der Schweiz, welche in der Energiestrategie 2050 des Bundes (ES2050) festgehalten sind.

Die erreichten Reduktionen in den vergangenen Jahren und neue, technische Lösungen verdeutlichen das grosse CO_{2,eq}-Reduktionspotenzial im Gebäudesektor. Darüber hinaus haben Gebäude viele Möglichkeiten, kostengünstig Energie zu sparen und zu produzieren [5]. Laut dem Global Energy Assessment Report (2012) könnte der Energiebedarf für Wärme und Kälte bis 2050 durch den Einsatz der heute verfügbaren, energieeffizienten Technologien gegenüber 2005 um rund 46 % gesenkt werden [6]. Viele dieser Energiesparmöglichkeiten werden jedoch nicht realisiert, obwohl sie im Vergleich zum kohlenstoffintensiven Status-quo gesamtwirtschaftlich überlegen wären [7].

Politische Massnahmen können dazu beitragen, den Energieverbrauch und die CO_{2,eq}-Emissionen im Gebäudesektor zu reduzieren. Ein politisches Instrument, das sich in der Vergangenheit bei der Reduktion des Energieverbrauchs und auch der CO_{2,eq}-Emissionen des Gebäudesektors als sehr effektiv und effizient erwiesen hat, sind die TER. Solche TER legen Mindestanforderungen zur Energienutzung und Erzeugung erneuerbarer Energien bei den Gebäuden fest [8], [9]. TER gehen bis auf das Jahr 1946 in Schweden zurück und wurden seit der Ölkrise Mitte der 70er Jahre in vielen anderen Ländern weltweit eingeführt. Heutige TER regulieren umfassend Wohn- und Gewerbebereich sowie Neu- und Bestandsgebäude [8]. Bisherige Studien haben gezeigt, dass TER massgeblich dazu beigetragen haben, den Energieverbrauch von Gebäuden in Europa [10] und China [11] um bis zu 22 % und in bestimmten Regionen Indiens [12] sogar um bis zu 42 % zu senken. In der Schweiz hat sich der Endenergiebedarf für Raumwärme in den letzten 20 Jahren trotz erheblichem Zuwachs der Energiebezugsflächen um rund 10% verringert [4]. Im Zusammenhang mit dem gewichtigen Beitrag der Gebäude zu den globalen CO_{2,eq}-Emissionen hat die Wirksamkeit von TER dazu geführt, dass viele Länder die TER in ihre Klimaschutzmassnahmen im Rahmen des Pariser Übereinkommens über den Klimawandel [8] einbezogen haben.

Typische Anforderungen in TER sind bauliche Massnahmen wie die Wärmedämmung der Gebäudehülle, der Austausch von Fenstern und die Installation von erneuerbaren Systemen wie Biomassekessel, Photovoltaik bzw. Solarkollektoren oder Wärmepumpen, welche Umweltwärme nutzen. Neuere Entwicklungen die in TER derzeit nur beschränkt berücksichtigt werden, sind Lösungen auf Quartier- und Arealebene wie Fernwärmenetze, Micro-Grids, Quartierzentralen, virtuelle Kraftwerke, Zusammenschlüsse für den Eigenverbrauch (ZEV), etc. Ein wichtiges TES Instrument in der Schweiz, welches die Transformation des Gebäudeparks ermöglicht, sind die Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEN), welche kantonale in eine TER überführt werden kann. Die lange und erfolgreiche Geschichte der MuKEN und ihrer Vorgänger zeigt, dass sich dieses Instrument stetig weiterentwickelt und angepasst hat und auch eine hohe Akzeptanz

geniesst. Die aktuelle MuKEn:2014 [13] ist z.Zt. in der Umsetzungsphase und macht den Weg frei für die Entwicklung des Nachfolgers. Der internationale Vergleich zeigt, dass die MuKEn:2014 eine zeitgemässe und mindestens teilweise innovative TER ist. Das aktuelle Konzept und die heutigen Vorgaben sind jedoch an einem Punkt an welchem die Wirkung vor allem bei Neubauten kaum noch weiter zunimmt und die Komplexität neuen Lösungen und Planungsprozessen nicht mehr gerecht wird [10], [14]–[16].

Angesichts der jüngsten Entwicklungen bei den neuen Technologien und Lösungen sowie immer anspruchsvolleren CO_{2,eq}-Zielen muss sich die TER weiterentwickeln. Folglich konzentriert sich dieses Forschungsprojekt darauf wie die zukünftige TER gestaltet werden kann und legt den Fokus auf die Transformation der bestehenden Gebäude. Die heutigen TER werden zukünftig an technische, wirtschaftliche und soziale Grenzen stossen. Eine vollständige Beibehaltung der heutigen Massnahmen nach dem Prinzip "weiter wie bisher" wäre eine verpasste Chance. Neue Methoden, Konzepte und Elemente auf dem Gebiet der TER sollen untersucht und gegebenenfalls in einer zukünftigen TER berücksichtigt werden. Das vorliegende Forschungsprojekt EnTeR sucht dementsprechend nach neuen Ansätzen mit dem Ziel, eine Grundlage zu schaffen, um die zukünftige TER und deren Umsetzung so einfach wie möglich zu gestalten, verbunden mit einem grösstmöglichen Freiheitsgrad für eine grösstmögliche Wirkung von zukünftigen Lösungen.

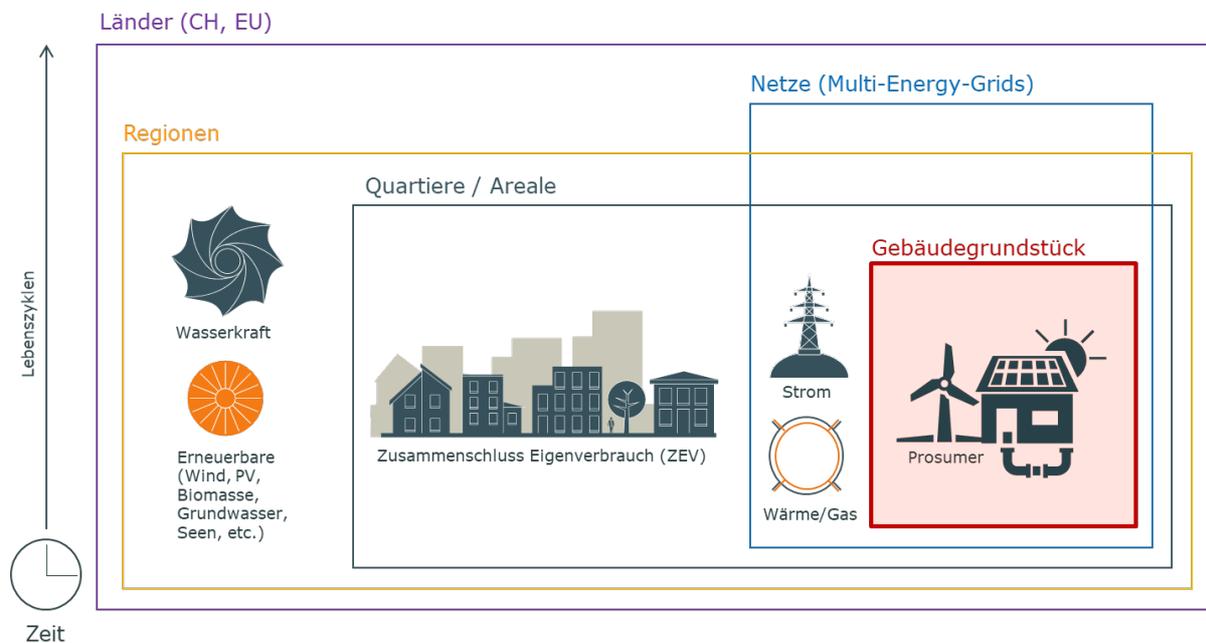


Abbildung 1: Lösungsraum mit erweiterten Systemgrenzen, jedoch beibehaltenem Fokus auf das Gebäude und dessen Grundstück (Eigentum).

3 Vorgehen

Während die Massnahmen bestehender TER sich vornehmlich auf bautechnische Themen und auf den Raum innerhalb der Eigentumsgrenzen beschränken, wird in diesem Projekt der Lösungsraum für die zukünftige TER erweitert (siehe Abbildung 1). Dies eröffnet ein breiteres Spektrum an Forschungsfragen, da viele Aspekte des Energieverbrauchs und zunehmend auch der Produktion an und in Gebäuden Auswirkungen auf das Energiesystem weit über die Grundstücksgrenzen hinaus haben und umgekehrt. Das Projekt ist in vier aufeinander aufbauende Arbeitspakete (WP1-4) strukturiert:

WP 1: Innovative Ansätze von TER und deren Umsetzung werden auf nationaler und internationaler Ebene identifiziert, strukturiert und bewertet.

WP 2: Typische Massnahmen für bestehende und neue Gebäude werden auf ihre Wirkung (Energieverbrauch und CO_{2,eq}-Reduktion) auf nationaler Ebene analysiert. Diese Massnahmen werden bezüglich den Zielen der ES2050 beurteilt.

WP 3: Um festzustellen, welche spezifischen Massnahmen auf Gebäude- und Quartierebene am effektivsten bezüglich Kosten-Nutzen (CO_{2,eq}-Reduktion) sind, wird der Gebäudepark Schweiz modelliert. Damit können verschiedene Massnahmen simuliert und die optimalen Lösungen identifiziert werden.

WP 4: Basierend auf Erkenntnissen aus WP1, WP2 und WP3 werden die wirksamsten Massnahmen identifiziert und mit zusätzlichen Expertenmeinungen werden mögliche, zukünftige Konzepte für TER hergeleitet. Anschliessend wird ein TER Konzept mit Massnahmen, welche die grössten Wirkung bei deren Regulierung versprechen, vorgeschlagen. Ein Ausblick zeigt am Schluss, welche Möglichkeiten und Herausforderungen bei der Umsetzung und im Vollzug bestehen.

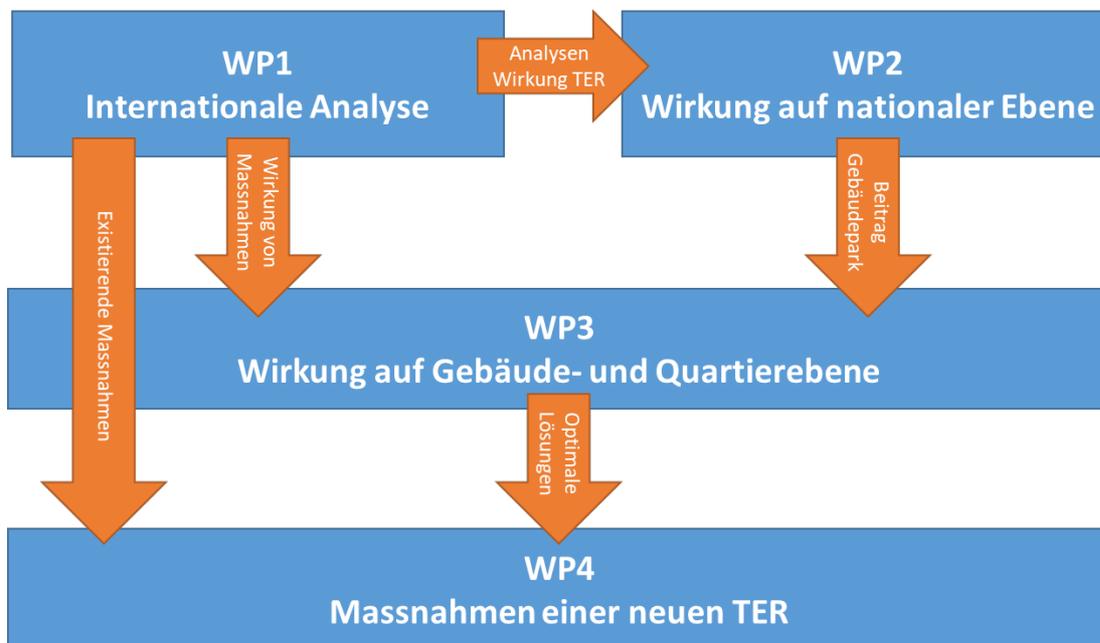


Abbildung 2: Struktur der Arbeitspakete WP1 bis WP4 (Workpackages)

4 Methode und Resultate

4.1 WP1: Internationale Analyse

Grundlagen und bisherige Forschung: Trotz ihrer globalen Erfolgsgeschichte scheinen TER in ihrer derzeitigen Ausgestaltung an ihre Grenzen zu stossen wenn es um die weitere Dekarbonisierung des Gebäudesektors geht³ [10], [14]–[16]. In der Literatur werden folgenden fünf Bereiche hierfür aufgeführt:

(i) Steigerung der Energieeffizienz: TER konzentrierten sich traditionell auf präskriptive Anforderungen für einzelne Gebäudeteile (z. B. U-Wert) und weniger auf eine Systembetrachtung der Gebäudeenergieeffizienz und die damit verbundenen CO_{2,eq}-Emissionen. Zur Reduktion des Energieverbrauchs hat die stetige Verschärfung präskriptiver Vorschriften eine abnehmende Wirkung. So kann beispielsweise die erste Dämmung einer nicht-gedämmten Wand den Wärmeverlust um etwa 75 %, reduzieren, während eine weitere Zugabe der gleichen Dämmstärke nur noch eine Reduktion von 11 % ergibt [14].

(ii) Berücksichtigung der «Grauen Energie»: Heutige TER regulieren nur den Energieverbrauch während der Nutzungsphase von Gebäuden und vernachlässigen somit die «Graue Energie» – die Energie, welche zur Produktion und Verarbeitung von Baumaterialien verwendet wird. Diese Vernachlässigung kann bei älteren, konventionellen Gebäuden hingenommen werden, da bis zu 90 % ihres Lebenszyklus-Energiebedarfs während der Nutzungsphase anfallen. Im Gegensatz dazu fallen jedoch bei Nahezu-Null-Energie-Gebäuden bis zu einem Drittel ihres Energieverbrauchs und bis zur Hälfte ihrer Lebenszyklus- CO_{2,eq}-Emissionen während der Bau- und Produktionsphase an [15].

(iii) Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien: Obwohl erste Schritte unternommen werden, um den Einsatz erneuerbarer Energietechnologien in Gebäuden zu regulieren, erlauben die meisten TER immer noch fossile Heizsysteme. Was dazu führt, dass fossile Heizsysteme immer noch die vorherrschende Technologie im Gebäudebestand sind, trotz wirtschaftlich und ökologisch überlegener Alternativen. Zunehmend werden daher TER erweitert, z.B. durch einen verpflichteten Umstieg auf erneuerbare Systeme bei einem Heizungsersatz, um die Integration erneuerbarer Energien in Gebäuden besser zu regulieren [14].

(iv) Schliessen des «Performance Gaps»: Bisher regulieren TER hauptsächlich Planungswerte, nicht aber den tatsächlich gemessenen Energieverbrauch [11], trotz eines signifikanten Unterschieds zwischen Planwerten und gemessenem Energieverbrauch – dem so genannten «Performance Gap» [16]. Während der Performance Gap sowohl ein positives als auch negatives Vorzeichen haben kann werden die Planwerte meistens überschritten. Eine Vergleichsstudie zu Nichtwohngebäuden zeigt z.B. einen durchschnittlichen Performance Gap von 34%⁴ [1.1]. Die Gründe für den Performance Gap sind vielfältig, unter anderem, eine abweichende Anzahl der Gebäudenutzer, von den Annahmen abweichende Raumtemperaturen, nicht-bedarfsgerechte Anlagensteuerung, unpassender Detaillierungsgrad der Berechnungsmodelle und Installation von anderen bzw. zusätzlichen Verbrauchern [1.2].

³ TERs wurden ursprünglich mit dem Ziel eingeführt, den Energiebedarf des Gebäudesektors zu senken. Da sich jedoch die Energie- und Klimapolitik zunehmend auf die Reduktion von CO_{2,eq}-Emissionen konzentriert, fokussiert sich diese Studie auf die Dekarbonisierung des Gebäudesektors. Eine Dekarbonisierung des Gebäudesektors baut jedoch auf zwei Säulen auf, nämlich der Reduzierung des Gebäudeenergiebedarfs und der Bereitstellung des verbleibenden Energiebedarfs aus erneuerbaren Energiequellen. Womit ebenfalls die Reduktion des Energiebedarfs von Gebäuden berücksichtigt wird.

⁴ Die Ergebnisse der Vergleichsstudie basieren zu einem großen Teil auf Berechnungen der Gebäudeeffizienz während der Planungsphase; nicht-regulierte Lasten wie Energie für Haushaltsgeräte werden hinzugefügt und ein Regelbetrieb nach Standardwerten wird angenommen.

(v) Beschleunigung der Sanierungsrate: Die meisten heutigen TER regulieren Sanierungen weniger streng als Neubauten, mit dem Ziel die Kosten für Sanierungen zu reduzieren. Trotzdem liegen die derzeitigen Sanierungsraten in vielen Industrieländern bei 1-2 % pro Jahr [1.3], in der Schweiz sogar nur bei 1%⁵ [1.4]. Die niedrigen Sanierungsraten verlangsamen die Dekarbonisierung des gesamten Gebäudebestandes und gefährden Ziele zur Reduktion von CO_{2,eq}-Emissionen.

Obwohl bisherige Studien einzelne dieser Schwerpunkte untersuchen – die wir im Folgenden als «Ansatzpunkte» bezeichnen – fehlt eine umfassende Analyse, wie TER diese Ansatzpunkte zukünftig angehen könnten. Einzelne Länder zeigen mit innovativen TER wie dieser Ansatzpunkte bereits adressiert werden könnten. Wir wollen daher verstehen, wie diese innovativen TER die fünf Ansatzpunkte für eine beschleunigte Dekarbonisierung des Gebäudebestands angehen (vgl. Kapitel 4.1.1) und wie die Schweiz von innovativen TER lernen könnte (vgl. Kapitel 4.1.2).

4.1.1 Innovative energietechnische Regulierungen im Gebäudebereich

Fünf Länder – Dänemark, Frankreich, England, die Schweiz und Schweden – wurden identifiziert, die bereits innovative Ansätze für einen oder mehrere der vorgestellten Ansatzpunkte in ihren TER umgesetzt haben. Um darzustellen, wie diese TER die fünf Ansatzpunkte für die Dekarbonisierung des Gebäudesektors angehen, zeigen wir:

1. einen Überblick über den Stand der Technik im Bereich TER
2. und skizzieren die innovativen Ansätze der einzelnen Länder.

Stand der Technik im Bereich TER: Tabelle 1 gibt einen Überblick über den Stand der TER in den fünf identifizierten Ländern. Im Folgenden wird der Stand der Technik für die fünf wichtigsten Ansatzpunkte skizziert.

		Dänemark	Frankreich	England	Schweiz	Schweden
Energieeffizienz	Systemanforderung	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	Präskriptiv	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	Leistung	-	-	-	Ja	Ja
Graue Energie	Systemanforderung	-	Ja (Pilot)	-	-	-
Erneuerbare Energien	Systemanforderung	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	Präskriptiv (direkt)	Ja	Ja	-	Ja	-
	Präskriptiv (indirekt)	Ja	-	Ja	-	-
	Präskriptiv (Verbot)	Ja	-	-	Ja	-
Performance Gap	Konformitätsprüfung	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Beschleunigung der Sanierungen	Anforderungen bei Sanierung	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	Forderung nach Sanierung	-	Ja	-	-	-

Tabelle 1: Überblick über den Stand der Technik der TER.

(i) Steigerung der Energieeffizienz: Um die Energieeffizienz zu erhöhen, haben alle untersuchten Länder Systemanforderungen eingeführt, welche vorwiegend den Primär- bzw. Endenergiebedarf regulieren. Zusätzlich wurden in allen Fällen entweder präskriptive Vorschriften für die Gebäudehülle oder eine weitere Systemanforderung für den gesamten Wärmebedarf festgelegt. Die Kombination der Regulierung der Primärenergie und des Endenergiebedarfs ermöglicht es den Ländern, einerseits den Energiebedarf des Gebäudes selbst und

⁵ In den Energieperspektiven für die Schweiz (2012) gibt prognos eine Rate von 1% für energetische Sanierungen in der Schweiz an, eine genau Definition von „energetische Sanierung“ fehlt jedoch. Eine Sanierungsrate von 1% scheint jedoch eher unwahrscheinlich, wenn diese auch ein Ersatz der Heizung oder Fenster beinhaltet. Die Schwierigkeit die Sanierungsrate exakt zu messen und definieren liegt auch daran, dass Sanierungsraten abhängig vom Bauteil sind und gerade beim Ersatz von Einzelbauteilen oft nicht in Bewilligungsstatistiken auftauchen.

andererseits die Primärenergie zur Deckung des verbleibenden Energiebedarfs zu minimieren. Einige Länder ergänzen ihre Vorschriften mit verbindlichen Anforderungen an die Gebäudetechnik und an die Heiz- bzw. Kühlleistung.

(ii) Berücksichtigung der Grauen Energie: Im Jahr 2018 reguliert keines der Länder die Graue Energie in ihren TER. In Frankreich, wird die Berücksichtigung der Grauen Energie in einer Pilotphase getestet und soll Teil der nächsten TER in 2020 werden. Hierzu wird die bestehende Systemanforderung zukünftig neben der Primärenergie der Nutzungsphase auch die Graue Energie enthalten. Darüber hinaus werden die CO_{2,eq}-Emissionen in einer neuen Systemanforderung berücksichtigt, welche die CO_{2,eq}-Emissionen während der Nutzungs- und Bauphase reguliert.

(iii) Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien: Um den Anteil erneuerbarer Energien in Gebäuden zu erhöhen, definieren die untersuchten Länder Systemanforderungen (hauptsächlich auf der Grundlage des Primärenergiebedarfs), welche die Nutzung sowohl von dezentraler erneuerbarer Energie im Gebäude als auch von zentraler erneuerbarer Energie jenseits der Grundstücksgrenze unterstützt. Des Weiteren, haben alle Länder – mit Ausnahme Schwedens – zusätzliche präskriptive Anforderungen an die Nutzung erneuerbarer Energien gestellt, z. B. durch direkte Vorschriften zur Nutzung erneuerbarer Energien, Verbote fossiler Brennstoffe oder verbindliche Bewertungen der wirtschaftlichen Machbarkeit erneuerbarer Energien.

(iv) Reduzieren des «Performance Gaps»: Um den Performance-Gap zu reduzieren, überprüfen die untersuchten Länder die Einhaltung der TER vor Baubeginn (Planprüfung) im Rahmen des Baugenehmigungsverfahrens und direkt nach dem Bau (Gebäudeabnahme). Darüber hinaus führen alle Länder – mit Ausnahme der Schweiz – auch eine Luftdichtigkeitsprüfung der Gebäudehülle durch.

(v) Beschleunigung der Sanierungsrate: Um die Dekarbonisierung des Gebäudebestandes zu beschleunigen, stellen alle untersuchten Länder weniger strenge Anforderungen an Sanierungen als an Neubauten. Darüber hinaus erlauben alle Länder – mit Ausnahme von Schweden – dass Gebäude bei Sanierungen präskriptive Vorschriften anstelle der Systemanforderungen wählen können.

Innovative Ansätze: Im folgenden Abschnitt stellen wir innovative Ansätze vor, die sich spezifisch mit einem der oben vorgestellten Ansatzpunkte befassen.

Dänemark – Steigerung der Energieeffizienz durch Ankündigung strengerer TER Jahre im Voraus: Dänemark hat den Energieverbrauch von Gebäuden drastisch reduziert, indem es erst freiwillige Niedrigenergieklassen einführte und dann frühzeitig – zwischen 5 und 10 Jahren vorher – ankündigte, wann diese verbindlich werden. Diese Ankündigung von TER Jahre im Voraus half der Bauwirtschaft langfristigen Ziele zu definieren, Innovation voranzutreiben und langfristig Kosten zu senken. Aus diesem Grund hat sich die Bauwirtschaft für die Ankündigung strengerer TER eingesetzt. Auch innovative Bauherren plädierten für die Ankündigung einer zukünftigen strengeren Regelung, da ein klares Ziel gesetzt wurde, auf welches sie sich fokussieren konnten (Planungssicherheit). Die letzte Niedrigenergieklasse – welche 2020 verpflichtend werden sollte und eine weitere Verschärfung der TER für Neubauten dargestellt hätte – wurde jedoch aus wirtschaftlichen Gründen gestoppt. Dänemark überlegt sich jedoch, für eine zukünftige Regulierung Nachhaltigkeitsziele für Gebäude zu definieren und diese Jahre im Voraus anzukündigen.

Frankreich – Berücksichtigung der Grauen Energie und Beschleunigung der energetischen Sanierungsrate durch situative Sanierungsverpflichtungen: Frankreich plant Graue Energie in die nächste TER aufzunehmen. Die Einführung ist jedoch eine Herausforderung, da umfangreiche Tests und kontinuierliches Lernen erforderlich sind. Dennoch wird erwartet, dass die Regulierung der Grauen Energie die französische Bauwirtschaft verändern wird. Neben der Berücksichtigung der Grauen Energie ist ein weiteres Ziel der französischen Politik, die Sanierung des Gebäudebestandes zu beschleunigen, indem sie beispielsweise vorschreibt, dass alle privaten Wohngebäude, welche einen höheren Jahresenergieverbrauch als 330 kWh/m² pro Jahr für Raumheizung und Warmwasser aufweisen (i.e. mehr als 30% aller privaten Wohngebäude), bis 2025 saniert werden

müssen⁶ [1.5]. Trotz dieser ehrgeizigen Vorgabe fehlt es momentan immer noch an Regulierungen, welche die Ziele in konkrete Massnahmen umsetzen. Die genannten Gründe dafür sind, dass (i) Sanierungsverpflichtungen zusätzliche Kosten verursachen, (ii) die Sanierungsverpflichtung auf dem französischen Energieausweis basiert, welcher von der Bevölkerung als unzuverlässig angesehen wird, und (iii) die Vorschrift weniger umfassende Sanierungen hervorbringen könnte.

England – Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien durch die Einführung einer CO_{2,eq}-Kennzahl: England definiert Systemanforderungen basierend auf CO_{2,eq}-Emissionen, mit dem Ziel Gebäudeanforderungen an nationale Ziele und internationale Verpflichtungen anzubinden. Infolgedessen wurden Technologien mit geringem CO_{2,eq}-Ausstoss vermehrt installiert. Die Berechnung auf Basis von CO_{2,eq}-Emissionen wird jedoch als zunehmend kritisch empfunden und wird eventuell durch eine Berechnung auf Basis von Primärenergie abgelöst. Drei Gründe wurden dafür genannt: (i) Die Verringerung der Kohlenstoffemissionen führt nicht immer zu energieeffizienten Gebäuden, (ii) die Primärenergiefaktoren sind stabiler als die Kohlenstoffemissionsfaktoren, (iii) die EU fördert die Reduktion der Primärenergie.

Schweiz – Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien durch präskriptive Regulierung: Die Schweiz baut die erneuerbaren Energien in Gebäuden aus, indem sie (i) neue Gebäude verpflichtet, vor Ort eine gewisse Menge Elektrizität selbst zu produzieren und (ii) Wohngebäude, welche über eine fossile Feuerung verfügen, verpflichtet werden, im Falle eines Heizkesslersatzes eine Anlage mit mindestens 10 % erneuerbaren Energien zu installieren. Schweizer Experten empfinden beide Anforderungen als effektiv, um mehr erneuerbare Energien in Gebäuden zu nutzen, betonen aber auch die Herausforderungen in ihrer Umsetzung: Die obligatorische Erzeugung von Elektrizität vor Ort wird als technologiespezifisch und anspruchsvoll für kompakte Gebäude kritisiert. Im Fall eines Kesselwechsels wird die Vorgabe zur Deckung von 10% des Wärmebedarfs auf Basis erneuerbarer Energien wegen steigender Investitionskosten für Gebäudebesitzer kritisiert.

Schweden – Reduktion des Performance Gap durch gemessenen Energieverbrauch: Schweden strebt danach, den Performance Gap zu reduzieren, indem die Einhaltung der Vorschriften zwei Jahre nach der Inbetriebnahme der Gebäude durch Energiemessungen kontrolliert wird. Diese gemessene Konformitätsprüfung wird von Bauträgern, Eigentümern und Gemeinden unterschiedlich bewertet. Insbesondere spielt die Grösse der Akteure eine wichtige Rolle bei der Beurteilung. Grössere Akteure bevorzugen eher die gemessene Überprüfung, während kleinere Akteure eher die alternativ berechnete Überprüfung bevorzugen. Trotz dieser Unterschiede für grosse und kleine Akteure bevorzugt die Regulierungsbehörde einen Vollzug basierend auf Messwerten. Drei grosse Herausforderungen des Vollzugs von Messwerten haben sich gezeigt: (i) Die gemessenen Energieströme stimmen häufig nicht mit den regulierten Energieströmen überein⁷. (ii) Es ist eine heikle Aufgabe, den Bauherrn bei Nichteinhaltung zwei Jahre nach der Inbetriebnahme des Gebäudes zu bestrafen. (iii) Häufig fehlt den kleineren Gemeinden die personelle Kapazität, um die Einhaltung der Vorschriften für Gebäude zwei Jahre nach Inbetriebnahme zu überprüfen. Schweden plant, die beiden letztgenannten Herausforderungen anzugehen, indem es einerseits die Verantwortung für die abschliessende Konformitätskontrolle von den lokalen Gemeinden auf die Ebene der zentralen Regulierungsbehörde verlagert und andererseits die Konformitätsprüfung mit der Ausstellung des Energieausweises kombiniert.

Durch die Synthese der Herausforderungen bei der Umsetzung in den fünf Fallstudien leiten wir sechs Grundsätze für die Gestaltung von TER ab. Diese sind allgemein anwendbar und stellen sicher, dass die TER ihre Wirkung entfalten. Wir vertreten die Ansicht, dass die Vor- und Nachteile innovativer TER besonders ausgeprägt werden, wenn politische Entscheidungsträger während der Umsetzung vor neuen Herausforderungen stehen. Die Dekarbonisierung ermöglicht es uns, neue Handlungsempfehlungen für die Gestaltung

⁶ In Frankreich betrifft dies mehr als 30% aller privaten Wohngebäude. Der durchschnittliche Energieverbrauch von Gebäuden in Frankreich beträgt 240 kWh/m².

⁷ Zum Beispiel, wird meistens der gesamte Stromverbrauch gemessen, während Stromverbrauch durch Geräte nicht reguliert wird.

von TERs zu formulieren. Wir empfehlen der Politik, diese Grundsätze bei der Umsetzung innovativer TER-Konzepte anzuwenden, um eine breite Akzeptanz bei allen Akteuren des Bausektors zu erreichen. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die sechs TER-Grundsätze und deren Erläuterungen, wie diese zu anzuwenden sind.

TER Gestaltungsgrundsätze	Erläuterungen zur Anwendung
<i>Zusätzliche Belastungen für den Bauherrn geringhalten</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Berücksichtigen von technischen Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitstests - Kombination von TER mit zusätzlichen Maßnahmen wie z.B. zinsloser Finanzierung, um die Investitionsbelastung zu verringern.
<i>Schaffung langfristiger Regulierungssicherheit</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Ausrichtung der TER an den nationalen Energie- und Klimazielen - Vorankündigung der zukünftigen TER - Integration von Prozessen zur kontinuierlichen Verbesserung
<i>Technologiespezifische Anforderungen beachten</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Stellen Sie sicher, dass mehrere Technologieoptionen verfügbar sind
<i>Auswirkungen neuer Vorschriften auf kleinere Akteure antizipieren</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Unterstützung kleiner Unternehmen durch Reduzierung unnötiger administrativer Kosten - Unterstützung kleiner Behörden, indem sie die Belastung durch kapazitätsintensive Vollzugskontrollen verringern
<i>Förderung von Wissens über innovatives Gestaltung</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Vorankündigung der zukünftigen TER - Durchführung von Testprogrammen - Aufbau auf freiwilligen Labels - Lernen Sie von der Gesetzgebung der Pioniere.
<i>Integration in den lokalen Kontext</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Nutzung der bestehenden Infrastruktur - Berücksichtigen der Dekarbonisierung beim Stromnetz in Bezug auf Niveau und Tempo - Nutzung einheimischer Ressourcen - Berücksichtigen Sie die Qualität der nationalen Bauwirtschaft. - Politische Machbarkeit prüfen

Table 2: Übersicht TER Gestaltungsgrundsätze und Erläuterungen zur Anwendung (Referenzen siehe WP1)

4.1.2 Wie könnte die Schweiz von innovativen Ansätzen der TER lernen?

Die MuKen:2014 nimmt eine Schlüsselrolle bei der Transformation des Schweizer Gebäudeparks hin zu einem nahezu CO_{2,eq}-freien Sektor ein. Sie ist eine zeitgemässe Regulierung und nimmt darüber hinaus eine Vorreiterrolle ein, indem sie die Elektrizitätserzeugung vor Ort sowie erneuerbare Energien zur Wärmebereitstellung vorschreibt. Im Hinblick auf die Energiestrategie 2050, könnte ein potentieller Nachfolger der MuKen:2014 – die sogenannte MuKen:20XX – jedoch von innovativen Ansätzen der TER anderer Länder lernen. Im Folgenden werden die durch die Analyse internationaler und innovativer TER erhaltenen Einsichten auf die Schweiz adaptiert. Dieses Kapitel stellt jedoch keine Empfehlung für das Design der MuKen:20XX dar, sondern listet lediglich auf, wie die Schweiz von den innovativen Ansätzen internationaler TER lernen könnte.

Zur Steigerung der Energieeffizienz könnte die MuKen:20XX die Anzahl der einzelnen Regulierungen reduzieren und sich stattdessen auf zwei zentrale Systemanforderungen konzentrieren, nämlich den Gesamtenergiebedarf und den Primärenergiebedarf. Während die erste Kennzahl den Gebäudeenergiebedarf minimiert, reduziert die zweite Kennzahl den Einsatz fossiler Brennstoffe zur Deckung des verbleibenden Energiebedarfs. Alternativ könnte sich die letztgenannte Systemanforderung anstatt auf Primärenergie auf CO_{2,eq}-Emissionen konzentrieren und so die Bauvorschriften stärker an die nationalen Ziele zur Dekarbonisierung binden. Eine Ausweitung von Systemanforderungen hat jedoch insbesondere für kleine Bauprojekte Herausforderungen in der Praxis und im Vollzug.

Um den Anteil der erneuerbaren Energien zu erhöhen, könnte die MuKE:20XX zum einen den Ausstieg aus Öl- und Gaskesseln in Gebäuden beschleunigen und zum anderen die Systemgrenzen der Energieverordnung von Gebäuden auf Quartiere ausweiten. Während die MuKE:2014 für Wohngebäude die Installation einer Heizungsanlage auf Basis von mindestens 10 % erneuerbarer Energie im Falle eines Gas- und Ölkesselwechsels vorschreibt, könnte die MuKE:20XX Öl- und Gaskessel direkt verbieten. Darüber hinaus könnte die Erweiterung der Grenze von Systemanforderungen von der Gebäudeebene auf die Quartierebene die Integration erneuerbarer Energien vorantreiben – Quartiere profitieren aufgrund des Zusammenschlusses mehrerer Gebäude von Skaleneffekten hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von Technologien und des Ausgleichs von Lastprofilen.

Um die Graue Energie zu berücksichtigen, könnte die MuKE:20XX eine Lebenszyklusperspektive einnehmen und entweder zusätzliche Energie- und Kohlenstoffquellen in die bestehenden Kennzahlen aufnehmen oder eine neue Kennzahl speziell für Graue Energie einführen. Da eine Regelung zur Grauen Energie in den TER in der Schweiz ein Novum wäre, wird eine vorherige Prüfung bzw. Testphase empfohlen. Das freiwillige Schweizer Label Minergie-Eco definiert bereits heute Anforderungen an die Graue Energie und die SIA 2032:2009 (Merkblatt zur Grauen Energie von Gebäuden) beschreibt eine Berechnungsmethode für Graue Energie⁸. Basierend auf den Daten und Erfahrungen mit Labels und Normen könnte die Schweiz kostengünstige Lösungen zur Berücksichtigung der Grauen Energie identifizieren und diese wiederum in die zukünftige MuKE:20XX integrieren. Wenn die gesammelten Daten unzureichend wären, könnte eine Pilotphase ähnlich dem französischen Testprogramm helfen. Darüber hinaus könnte die Vorankündigung von Anforderungen an die Graue Energie ein Signal an die Industrie sein – betroffene Firmen würden versuchen die Graue Energie in Ihren Produkten zu reduzieren oder auf Produkte mit einer geringeren Grauen Energie zu wechseln. Dies in Analogie zur Strategie, welche in Dänemark erfolgreich für die Energieeffizienz eingesetzt wurde.

Um den «Performance Gap» zu reduzieren, könnte die MuKE:20XX entweder den aktuellen Vollzug anpassen oder einen neuen Vollzug auf der Basis von gemessenem Energieverbrauch einführen (siehe Schweden). Eingabeparameter, welche für die Berechnung der Energiekennzahlen entscheidend sind, werden oft stark vereinfacht; die Eingabeparameter könnten genauere Wetterdaten und Umweltbedingungen berücksichtigen, während Messsysteme mehr Daten über das tatsächliche Nutzerverhalten liefern könnten. Alternativ könnte die MuKE:20XX den Vollzug auf der Grundlage der gemessenen statt der berechneten Energiekennzahlen verlangen und damit dem schwedischen Ansatz folgen. In Schweden fehlte es kleineren Gemeinden jedoch an Fachwissen und Kapazitäten, um die Energieeffizienz von Gebäuden zwei Jahre nach ihrer Inbetriebnahme zu überprüfen. Da viele kleine Gemeinden für den Vollzug in der Schweiz verantwortlich sind, wird empfohlen, diesen Ansatz in einem freiwilligen Modul oder mit Minergie-Gebäuden zu testen. Zudem könnte die Konformitätsprüfung bzw. der Vollzug mit der Ausstellung des Gebäudeenergieausweises der Kantone (GEAK) kombiniert werden⁹.

Um die Anzahl der energetischen Sanierungen zu erhöhen, könnte die MuKE:20XX Vorschriften enthalten, welche die Sanierung von Gebäuden mit niedriger Energieeffizienz fordern (siehe Frankreich). Nach dem französischen Vorbild könnte die MuKE:20XX im Voraus die Mindestniveaus bezüglich Energieeffizienz von bestehenden Gebäuden für die nächsten 10 Jahre festlegen. Um der Sorge vor steigenden Kosten für die Bauherren zu begegnen, könnte die MuKE:20XX dem Bauherrn erlauben, die Sanierungspflicht zu umgehen, indem nachgewiesen wird, dass eine Nachrüstung wirtschaftlich, technologisch oder auch aus Gründen des Denkmalschutzes nicht möglich ist – der GEAK Plus könnte die Rolle des Nachweises dieser Machbarkeit übernehmen. Darüber hinaus ist der Trade-off zwischen einerseits der Sanierungsrate und andererseits der Tiefe der Sanierungen zu berücksichtigen. Auch hier könnte der GEAK Plus eine führende Rolle spielen, indem er aufzeigt, welche Investitionen über die Lebensdauer am wirtschaftlichsten sind.

⁸ Aktuell in Überarbeitung – Vernehmlassung 2019 erwartet

⁹ In Schweden wird derzeit darüber diskutiert, ob die Konformitätsprüfung auf Basis vom gemessenen Energieverbrauch mit der Erstellung des Energy Performance Certificates zusammengelegt werden soll, mit dem Ziel kleinere Gemeinden zu entlasten. Das Energy Performance Certificate ist für neue Gebäude in Schweden verpflichtend.

4.2 WP2: Wirkung auf nationaler Ebene

Die zu erwartenden Auswirkungen der heute in Umsetzung stehenden TER wurde im Arbeitspakete WP2 untersucht. Die Analyse soll eine quantitative Einschätzung der Zielerreichung ES2050 liefern [2.1]. Dabei wurden zwei Szenarien untersucht: Weiter wie bisher, d.h. ohne Umsetzung der aktuellen MuKEN:2014 und vollständige Umsetzung der MuKEN:2014 in allen Kantonen. Die Entwicklung des Energiebedarfs und der verwendeten Energieträger sowie die CO_{2,eq}-Emissionen wurden beurteilt.

Um das Energie- und CO_{2,eq}-Reduktionspotenzial zu quantifizieren, wurde ein Top-Down-Prognosemodell entwickelt [2.2]. Der Energiebedarf, die CO_{2,eq}-Emissionen und der Elektrizitätsbedarf des Schweizer Gebädeparks bis 2050 wurde mit Hilfe verschiedener Datenbanken berechnet. Für Wohngebäude wurde das Schweizerische Gebäude- und Wohnungsregister (GWS) 2015 [2.3] als Datenbank verwendet, während für Nichtwohngebäude eine neue Berechnungsmethode entwickelt wurde, die auf dem Datensatz des Schweizerischen Unternehmensregisters [2.4] als Quelle basiert. Für die Identifizierung der Geschäftsstandorte wurde der topografische Datensatz swissBUILDINGS3D [2.5] verwendet. Damit wurden die Nicht-Wohngebäude deren Bruttogeschossfläche und Gebäudehöhe bestimmt.

Die Massnahmen wurden aus der MuKEN:2014 hergeleitet und deren Wirkung auf den Energieverbrauch und die Reduktion der CO_{2,eq}-Emissionen berechnet. Dafür wurde einerseits die Reduktion des Gebäudeenergiebedarfs durch die Erneuerung der Bauelemente wie Fassade, Fenster und/oder Dach, bei einer Sanierungsrate der Gebäudehülle von 1.5%/a, berücksichtigt. Andererseits wurde die Reduktion der CO_{2,eq}-Emissionen der Heizsysteme analysiert, wenn 80% der elektrischen Heizsysteme durch Wärmepumpen, 60% der Ölheizungen und 20% der Gasheizungen durch erneuerbare Heizsysteme ersetzt werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Reduktion des Energiebedarfs alleine bedeutsam zur Energie- und CO_{2,eq}-Reduktion beiträgt, aber nicht ausreicht um die Ziele der ES2050 zu erreichen. Der Ersatz fossiler Heizsysteme, wie Ölkessel oder Gasheizungen, erweist sich als effiziente und wirksame Massnahme zur Erreichung der CO_{2,eq}-Ziele. Insgesamt erwies sich eine Kombination beider Massnahmen als das am besten geeignete Szenario, um den Energieverbrauch und die CO_{2,eq}-Emissionen der Schweizer Gebäude so zu reduzieren, dass das Schweizer Elektrizitätsnetz nicht allzu stark zusätzlich belastet würde, wenn fossile Heizsysteme durch elektrizitätsabhängige Heizsysteme wie z.B. Wärmepumpen ersetzt würden.

Energieträger	LCA-Methode ¹⁰	BAFU-Methode [21]	Einheit
Öl	301	265	gCO _{2,eq} /kWh
Gas	228	203	gCO _{2,eq} /kWh
Elektrizität	102	0	gCO _{2,eq} /kWh
Weitere (Wärmepumpe, Holz, Fernwärme, Solar etc.)	siehe Referenz	siehe Referenz	gCO _{2,eq} /kWh

Tabelle 2: CO_{2,eq}-Faktoren in den beiden Szenarien Lebenszyklusanalyse (LCA) und Bundesamt für Umwelt (BAFU).

Abbildung 3 zeigt (a) die CO_{2,eq}-Emissionen unter Berücksichtigung der CO_{2,eq}-Faktoren basierend auf der Lebenszyklusanalyse für die verschiedenen Gebäudetypen (siehe auch Tabelle 2 für die CO_{2,eq}-Faktoren der verschiedenen Energieträger, LCA-Methode). Die Grafik (b) zeigt die CO_{2,eq}-Emissionen, wenn die CO_{2,eq}-Faktoren auf den durch das Pariser Abkommen festgelegten Werten basieren (siehe Tabelle 2, BAFU-Methode).

(a)

(b)

¹⁰ Gemäss Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB) 2009/1:2016

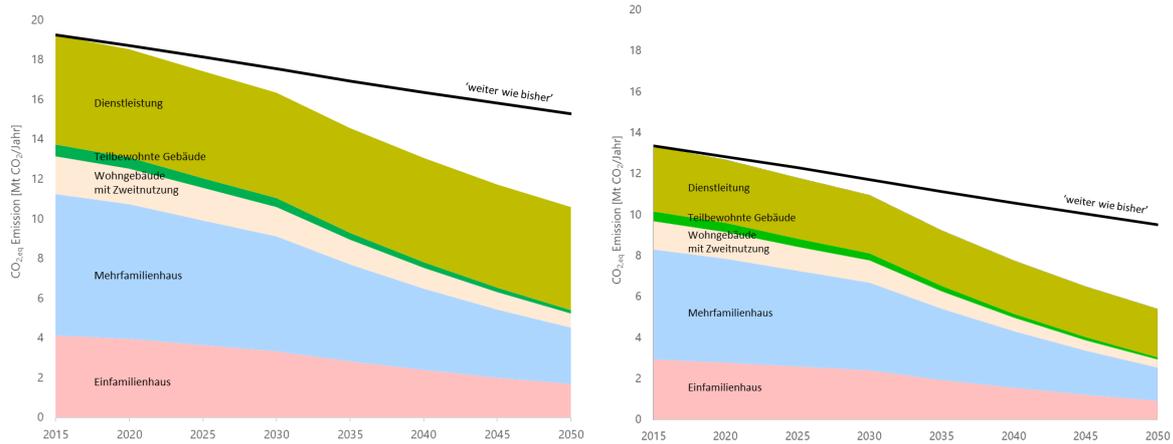


Abbildung 3: CO_{2,eq}-Emissionen aller Gebäude in der Schweiz (Gebäudebestand), ohne Emissionen aus Industrie und Mobilität. Die Grafik (a) zeigt die Emissionen gemäss der Lebenszyklusanalyse (LCA) für den Betrieb der Gebäude (z. B. ohne Graue Energie der Materialien). Die Grafik (b) zeigt die Emissionen nach der Berechnungsmethode des Pariser Abkommens.

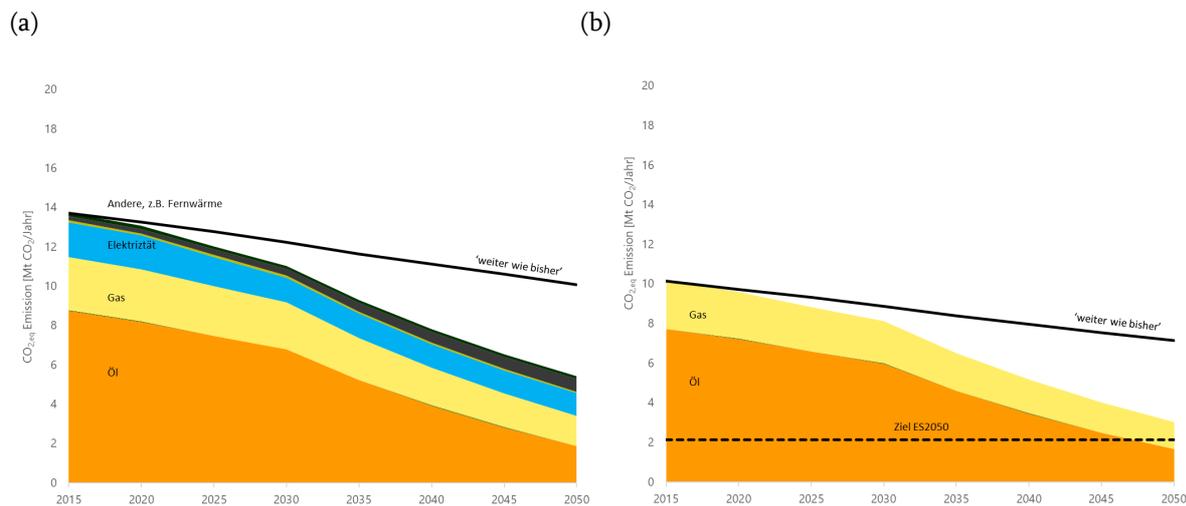


Abbildung 4: CO_{2,eq}-Emission von Schweizer Wohngebäuden. Wird die heutige MuKen:2014 nicht umgesetzt, werden die CO_{2,eq}-Emissionen nur leicht reduziert (schwarze Linie). Die Grafik (a) zeigt die Emissionen gemäss der Lebenszyklusanalyse (LCA) für den Betrieb der Gebäude (d. h. ohne Graue Energie). Die Grafik (b) zeigt die Emissionen nach der Berechnungsmethode des Pariser Abkommen. Wenn die MuKen:2014 in allen Kantonen vollständig umgesetzt würde, wird das CO_{2,eq}-Ziel der ES2050 (gestrichelte schwarze Linie) um rund 30 % verfehlt.

Die Analyse zeigt, dass die Regulierung, wie in der MuKen:2014 vorgeschlagen ist, nicht ausreicht, um die gesetzten CO_{2,eq}-Ziele zu erreichen. Das CO_{2,eq}-Ziel der ES2050 wird im Jahr 2050 um ca. 30 % verfehlt (siehe Abbildung 4b). Um das Ziel zu erreichen, müssen zusätzliche bzw. restriktivere Vorschriften vor allem für den Austausch von fossilen Heizungsanlagen in eine neue MuKen:20XX aufgenommen werden. Die geltenden Anforderungen an die Gebäudehülle für bestehende und zukünftige Gebäude gilt jedoch als ausreichend im Sinne der MuKen:2014. Abbildungen 3 und 4 zeigen die Auswirkungen der Erneuerung der Gebäudehülle bis 2030 und danach die zusätzlichen Auswirkungen des Heizsystemwechsels.

4.3 WP3: Wirkung auf Gebäude- und Quartiersebene

Die Analyse in WP2 zeigte, dass die derzeitigen Vorschriften nicht ausreichen, um das volle Reduktionspotenzial des Gebäudebestandes – insbesondere im Zusammenhang mit dem Austausch fossiler Heizungsanlagen – zu realisieren. Im WP3 werden die Massnahmen vertieft analysiert. Die detaillierte Modellierung des Gebäudebestandes ermöglicht die Simulation verschiedener Erneuerungs- und Energieversorgungszenarien und die Durchführung technisch-wirtschaftlicher Optimierungen zur Identifizierung optimaler Erneuerungslösungen. Um festzustellen, welche Lösungen am effektivsten sind, wurde eine kombinierte simulations- und optimierungsbasierte Methodik entwickelt, welche eine Multikriterien-Analyse durchführt, die sowohl Kosten als auch CO_{2,eq}-Emissionen berücksichtigt. Der Fokus dieser Optimierungen liegt sowohl auf Gebäude- wie auch auf Quartiersebene.

4.3.1 Wirkung auf Gebäudeebene

Als Ausgangspunkt müssen Spezifikationen und Eigenschaften des Schweizerischen Gebäudeparks identifiziert werden. Dazu wird ein archetypischer Ansatz angewendet, welcher Gebäude nach Gebäudeeigenschaften wie Alter, Gebäudetyp, Belegung, Anzahl der Wohnungen und Anzahl der Stockwerke sowie anderen verfügbaren Indikatoren gruppiert. Statistische Clustering-Methoden wie der "nearest neighbour" und der "k-medoid" Algorithmus werden verwendet, um die optimale Anzahl und die Charakteristik der Archetypen auszuwählen, welche den gesamten Schweizerischen Gebäudepark am besten repräsentieren. Diese identifizierten archetypischen Gebäude werden danach zur Beurteilung verschiedener Energieeffizienzmassnahmen und/oder Technologiemaassnahmen genutzt. Darüber hinaus werden Informationen über regionale und lokale Potenziale erneuerbarer Energieträger gesammelt – wie z. B. Solarpotenzial, Erdwärmepotenzial, Biomassepotenzial. Im Weiteren werden die Unterschiede im Energiebedarf aufgrund klimatischer Bedingungen in der Simulation berücksichtigt. Neben den Gebäuden (siehe Abbildung 5) werden archetypische Gemeinden identifiziert, welche die Schweiz in Bezug auf ihre urbanen Eigenschaften, den Energiebedarf und die Verfügbarkeit erneuerbarer Ressourcen am besten repräsentieren.

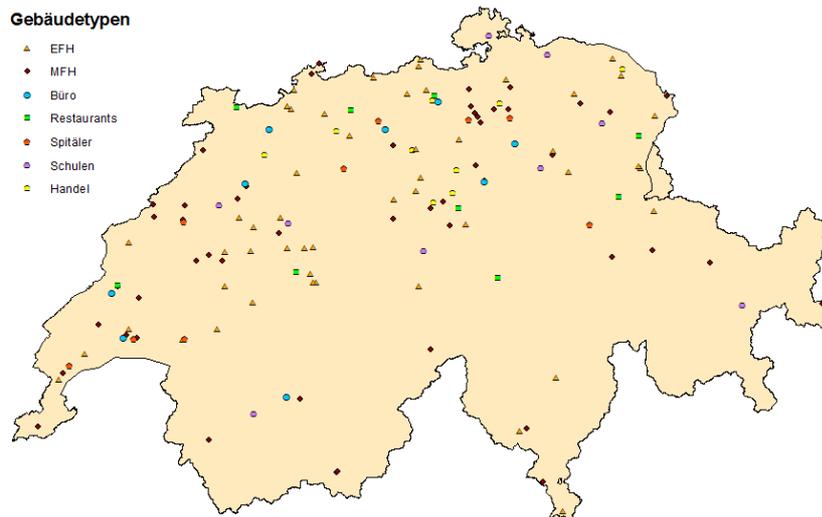


Abbildung 5: Auswahl der Archetypen (total 145 Gebäude) des Gebäudeparks der Schweiz (1,7 Mio. Gebäude).

In einem nächsten Schritt wurde ein Toolkit mit einer Reihe von verschiedenen Massnahmen entwickelt, welche die Energieeffizienz von Gebäuden erhöhen und/oder die Treibhausgasemissionen reduzieren. Zu den identifizierten Massnahmen gehören bestehende Massnahmen aus der aktuellen MuKen:2014, aber auch andere Gebäudeeffizienzsteigerungen, Systemeffizienzsteigerungen, dezentrale erneuerbare Erzeugungstechnologien und Lösungen auf Quartiersebene. Zur Verbesserung der Gebäudeeffizienz werden sowohl vollständige als auch teilweise Erneuerungsmassnahmen der Gebäudehülle berücksichtigt, welche auf verschiedenen

Kombinationen von Fenster-, Wand-, Dach- und Kellerdämmungen basieren. Um die Systemeffizienz zu verbessern, werden effizientere Elektrogeräte, Beleuchtung und Heizsysteme berücksichtigt. Die Integration von erneuerbaren Energien wie Photovoltaik, Solarthermie und Holzschnitzel/-pellets werden ebenfalls in den Berechnungen berücksichtigt. Darüber hinaus werden Wärmepumpen und Speichertechnologien auf Stufe der Gebäudeebene¹¹ und verschiedene Arten von Wärmenetzen mit erneuerbaren Energiequellen auf Stufe der Quartiersebene berücksichtigt.

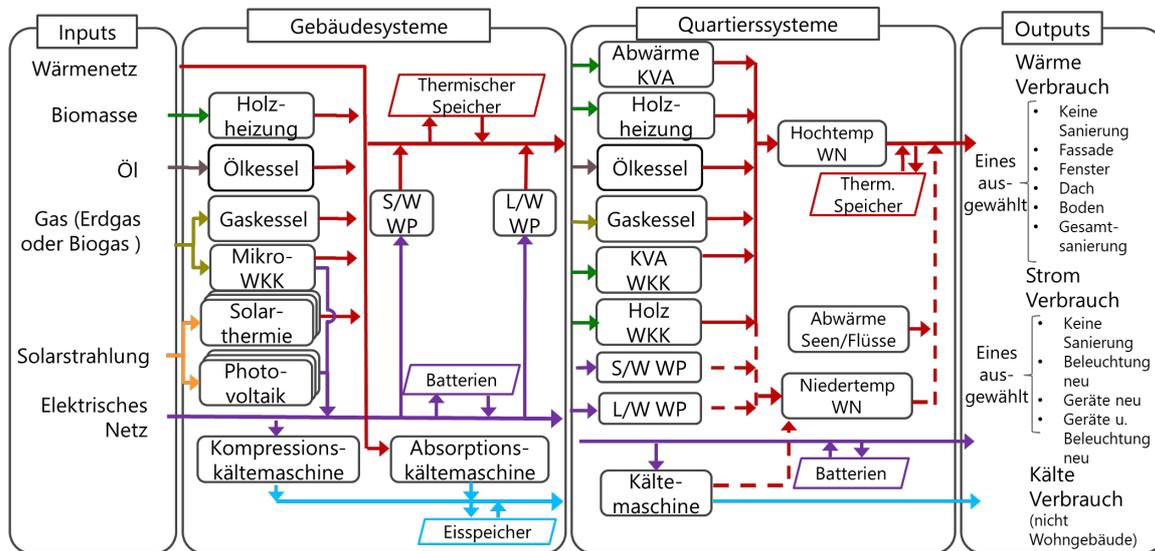


Abbildung 6: Energy-Hub Modell für die Gebäude- und Quartiersebene.

Basierend auf dem oben beschriebenen Modell werden die verschiedenen identifizierten Massnahmen anhand der archetypischen Gebäude und Quartiere bewertet. Die Analyse erfolgt mit einer Multikriterien-Optimierung auf Basis des Energy-Hub Modells [3.1, 3.2] (siehe Abbildung 6), welche die Erneuerung der Gebäudehülle, die Modernisierung von Gebäudetechnik und die Thermische Vernetzung sowie die Integration von erneuerbaren Technologien vor Ort berücksichtigen kann. Die Multikriterien-Analyse minimiert gleichzeitig sowohl die Treibhausgasemissionen (einschliesslich der Emissionen der Erneuerungen und Systemverbesserungen, d.h. ‚graue Treibhausgase‘) als auch die Lebenszykluskosten. Die möglichen Strategien zur Reduzierung der Energie- und $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Intensität von 2015 bis 2050 werden in dieser Analyse ebenfalls als Beurteilungskriterien herangezogen.

Wie bei jedem Energiesystemmodell müssen die Randbedingungen für das System vor der Modellierung des Systems festgelegt werden. Bei diesem Projekt sind sowohl die Gebäudeebene als auch die Quartiersebene von Interesse, da auf Quartiersebene mehr Technologien zur Verfügung stehen können, die eine stärkere Integration bestimmter Energieträger wie Umweltwärme, Abwärme und Biomasse ermöglichen.

Auf nationaler Ebene können die wirtschaftlichsten Lösungen für verschiedene Gebäudekategorien identifiziert werden. Abbildung 7 zeigt die aggregierten Pareto-Fronten für Ein-, Mehrfamilien- und Nichtwohngebäude auf Gebäudeebene. Aus dieser Abbildung kann je nach gewünschten spezifischen Treibhausgasemissionen $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{m}^2$ die optimale Erneuerungsstrategie und die daraus resultierenden Kosten für die jeweilige Gebäudekategorie abgelesen werden. Des Weiteren lässt sich ein $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Vermeidungspreis¹² für Lösungen mit

¹¹ Auf Stufe Areal wurden keine Speichertechnologien berücksichtigt. Eine Aggregation der Speicher auf Arealebene könnte wirtschaftliche Vorteile bringen. Die Allokation der Speicher muss separat untersucht werden.

¹² Dies sind die Kosten, die für die Reduzierung einer bestimmten $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Menge gegenüber einer Referenztechnologie (kostenoptimale Lösung in der Paretofront) aufzubringen sind. Zukünftig kann die Beurteilung auf (dynamische) Verminderungskosten ausgebaut werden.

niedrigeren CO_{2,eq}-Emissionen ermitteln. Ein Beispiel ist für Einfamilienhäuser in der Grafik angeführt, welches zeigt, welcher CO_{2,eq} Vermeidungspreis notwendig wäre um das Ziel der 10 kg CO_{2,eq}/m² zu erreichen.

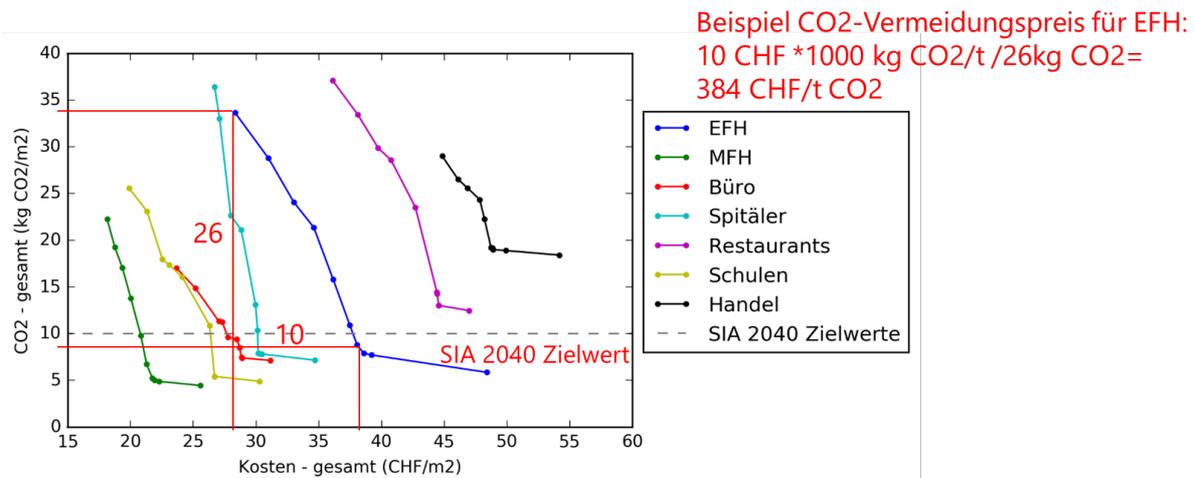


Abbildung 7: Pareto-Front für Einfamilien-, Mehrfamilien- und Nichtwohngebäude, die den schweizerischen Gebäudepark repräsentieren. Auf der y-Achse ist die totale CO_{2,eq}-Belastung als jährliche – über die Lebensdauer der verwendeten Komponenten und deren Betrieb – anfallende Emission je Quadratmeter Energiebezugsfläche aufgetragen. Die x-Achse zeigt die Lebenszykluskosten der gewählten Massnahmen.

Bei der Optimierung wird die ideale Erneuerung und die Systemauswahl entsprechend der Multikriterienfunktion gewählt. Es wird eine Erneuerungsoption gewählt, eine Heizungsanlage und ggf. eine Solaranlage definiert. Da in den Gebäuden bereits Heizungsanlagen installiert sind, kann die Optimierung entweder die bestehende Heizungsanlage (Ölkessel, Gaskessel, Biomasse, Elektroheizung oder Fernwärme) beibehalten oder eine neue und effizientere Heizungsanlage (Luft/Wasser-Wärmepumpe (L/W WP), Sole/Wasser-Wärmepumpe (S/W WP), Biomasse, Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) oder Gaskessel) wählen. Abbildung 8 zeigt am Beispiel der EFH und MFH die optimale Kombination von Gebäudehülle und Systeme für alle Archetypen. Die Grösse des Markers stellt dabei die Anzahl der dahinterliegenden m² des Gebäudestocks dar. Diese Abbildung zeigt, dass bei EFH vor allem Dachsanierungen zum Einsatz kommen, da es in der Regel die kostenoptimalsten Erneuerungslösungen sind. Die vielversprechendsten Heizsysteme sind Holzschneitzelheizungen oder Luftwärmepumpen. In bestimmten Fällen zeigt die Optimierung, dass die Elektroheizungen bei einer Erneuerung beibehalten werden, wobei eine solche Lösung bei weniger als 5 % aller optimalen Lösungen für Einfamilienhäuser auftritt. In der Regel sind zur Erreichung der Ziele sowohl eine Erneuerung der Gebäudehülle als auch ein Systemwechsel bei der Heizungsanlage erforderlich. Für fast alle Gebäude ist ein Ersatz einer fossil betriebenen Heizung erforderlich, um die Klimaziele zu erreichen.

Die Analyse zeigt auch, dass das Alter des Gebäudes ein wichtiger Faktor ist, um zu entscheiden, welche Lösung idealerweise umgesetzt wird. Abbildung 9 zeigt die optimalen Lösungen zur Zielerreichung sortiert nach Alter des Gebäudes. Neubauten (ab Baujahr 2000) profitieren stärker von effizienteren Techniksystemen und benötigen in der Regel keine Erneuerung der Gebäudehülle, um die Ziele zu erreichen. Ältere Gebäude (Baujahr vor 1990) sind oft kostengünstig zu erneuern und können danach auf ein Wärmepumpensystem als Heizsystem wechseln. Zu den wirksamsten Massnahmen zur Erreichung der CO_{2,eq}-Ziele für den Schweizer Gebäudepark gehören der Wechsel zu Biomassekesseln (Holzschneitzel, Pellets, etc.) oder Wärmepumpen (L/W- oder S/W-WP), die Dämmung der Dächer oder der Austausch von Fenstern in Kombination mit der Dämmung der Fassaden und zusätzlich die Installation von Photovoltaikmodulen.

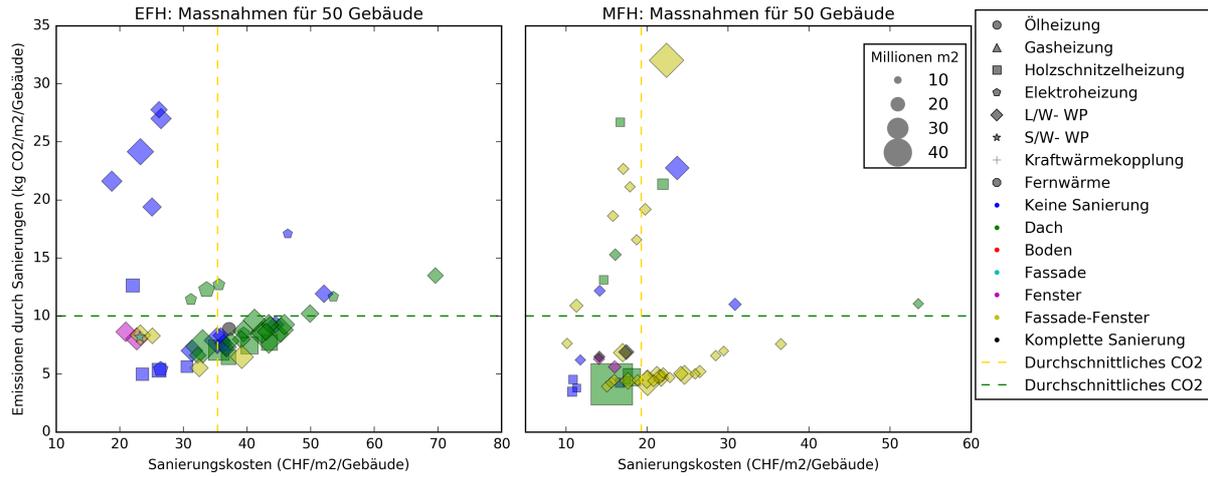


Abbildung 8: Die optimale Erneuerung und Systemauswahl für die 50 Archetypen (links EFH, rechts MFH). Die Grösse des Markers zeigt die Anzahl der m² gebauter Fläche die sie im Gesamtgebäudestock repräsentieren. Diese Lösungen repräsentieren die kostengünstigste Variante der Pareto Lösungen so dass der Gesamtgebäudestock das 10 kg CO_{2,eq}/m² Ziel erreichen.

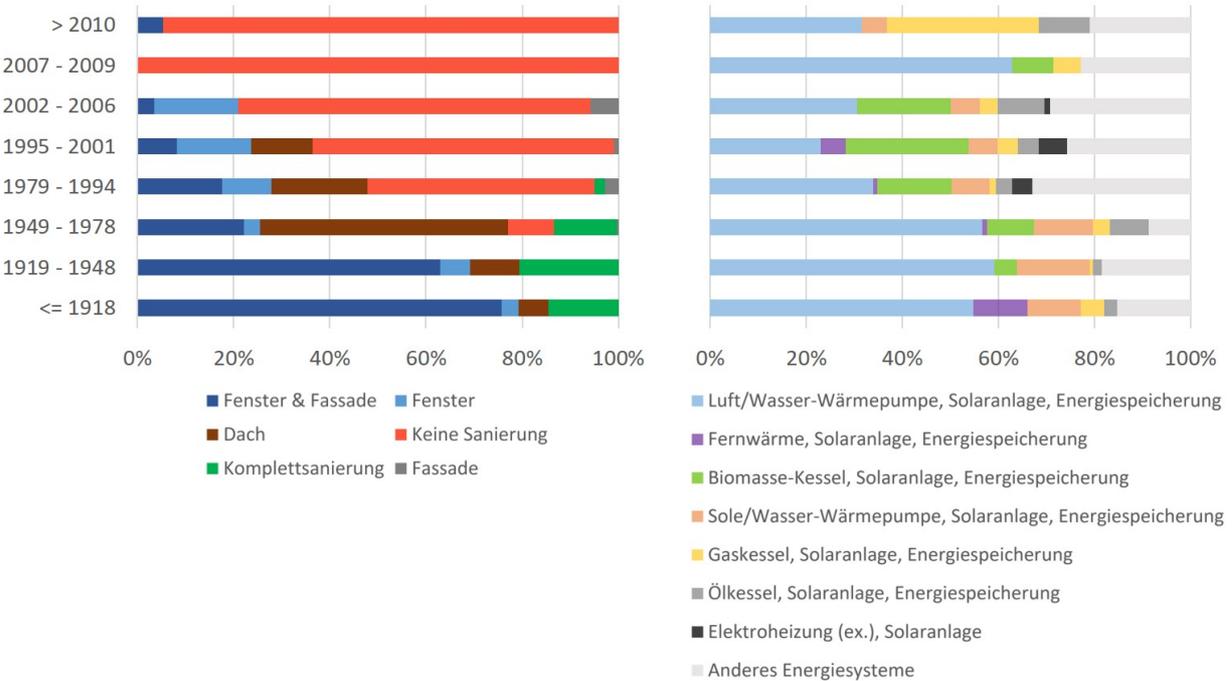


Abbildung 9: Typische Lösungen welche unter 10 kg CO_{2,eq}/ m² pro Jahr liegen, sortiert nach Alter der Gebäude. Bei den Solaranlagen wurden mehrheitlich PV-Systeme gewählt.

Schliesslich wurden angesichts der Langfristigkeit der Analyse mehrere Unsicherheitsquellen identifiziert, welche das Risiko bergen, die ausgewählten Massnahmen suboptimal zu kombinieren. Aus diesem Grund wurden Methoden der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse eingesetzt, um die Robustheit der ausgewählten Massnahmen zu untersuchen. Um einen robusten Satz von Lösungen zu identifizieren, wurden die gewünschte Wirkung für eine Reihe von verschiedenen Randbedingungen untersucht. Die Analyse basiert auf Monte-Carlo-Simulationen und berücksichtigt damit die Unsicherheit aufgrund von wirtschaftlichen, technischen und energetischen Aspekten sowie die Verfügbarkeit von erneuerbaren Energieträgern.

Die vorhergehende Analyse wurde deterministisch durchgeführt, d. h. es wurde angenommen, dass alle Eingangsparameter des Energy-Hub Modells mit absoluter Sicherheit bekannt sind. In Wirklichkeit sollten die meisten Eingangsparameter jedoch als unsicher angesehen werden, entweder weil sie inhärent stochastische Aspekte darstellen (z. B. Sonneneinstrahlungsmuster) oder weil es sehr schwierig ist, ihre wahren Werte (z. B. zukünftige Energieträgerpreise) genau zu bestimmen. Um robuste Gebäudeerneuerungsmassnahmen zu erhalten, ist es daher wichtig zu untersuchen, wie sich die optimalen Gebäudeerneuerungen und das optimale Energiesystem für verschiedene Werte der unsicheren Modellparameter ändern.

Dazu wird den wichtigsten Modellparametern eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zugeordnet. Dazu gehört der Gebäudeenergiebedarf, die Sonneneinstrahlungsmuster, die Investitionskosten und die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen von Energiesystemen und Erneuerungsmassnahmen, die Energieträgerpreise und Emissionsfaktoren sowie die technischen Eigenschaften von Energietechnologien. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen spiegeln die Tatsache wider, dass es für die meisten Parameter schwierig ist, die genauen Werte zu bestimmen. Insbesondere die Unsicherheit bezüglich der Kostensenkung neuartiger Technologien wie PV oder Batterien sowie die unsicheren Auswirkungen des Klimawandels auf den Kühl- und Wärmebedarf von Gebäuden gilt es hier zu nennen.

Nachdem die Wahrscheinlichkeitsverteilungen definiert sind, werden für jeden unbestimmten Parameter mehrere Stichproben gezogen und das Energy-Hub Modell mehrfach ausgeführt, um die Variationen der optimalen Lösungen zu identifizieren. Als Beispiel sind die Variationen der optimalen Gebäudehüllenerneuerung und die Verbesserung des Energiesystems für EFH in Abbildung 10 dargestellt.

Der Vergleich der deterministischen mit den stochastischen Lösungen zeigt insbesondere bei den Lösungen, welche die gewünschten $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Ziele erreichen (d. h. Emissionen von $<10 \text{ kg}_{\text{CO}_{2,\text{eq}}}/\text{m}^2$ gemäss SIA 2040), dass die Ergebnisse der stochastischen Analyse eine grössere Variabilität bezüglich der optimalen Erneuerungslösungen zeigen. So sieht beispielsweise im deterministischen Fall die überwiegende Mehrheit der Lösungen mit Emissionen von weniger als $5 \text{ kg}_{\text{CO}_{2,\text{eq}}}/\text{m}^2$ einen Biomassekessel vor. Dagegen ist im stochastischen Fall ein ausgewogenerer Mix zu beobachten, der neben Biomasse auch den Einsatz von Wärmepumpen (L/W- und S/W-WP) umfasst. Ebenso weisen die deterministischen Lösungen für $<5 \text{ kg}_{\text{CO}_{2,\text{eq}}}/\text{m}^2$ mehr als 40% "Keine Erneuerung" vor, während die stochastischen Lösungen nicht nur kleinere Anteile von "Keine Erneuerung" umfassen, sondern auch Fälle mit "Umfassende Erneuerung" aufweisen.

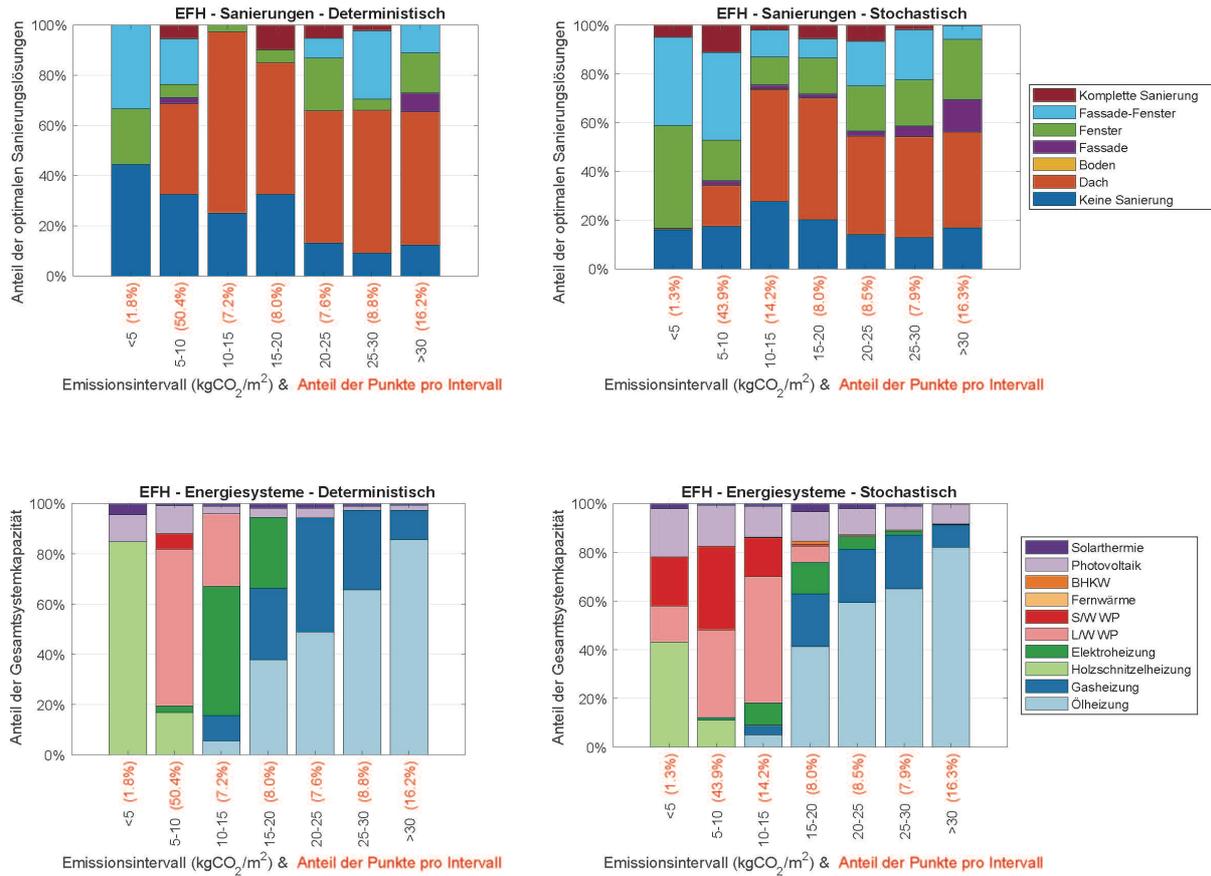


Abbildung 10: Optimale Gebäudehüllenerneuerung und energetische Systemwechsel für Einfamilienhäuser (EFH) als Ergebnis der deterministischen und der stochastischen Analyse (Punkte repräsentieren repräsentative Gebäude für den Gebäudepark Schweiz).

Die Tabelle 3 vergleicht den Satz typischer Lösungen, welche sich aus der deterministischen und der stochastischen Analyse ergeben. Um die typischen Lösungen zu identifizieren, werden alle Kombinationen von Gebäude- und Energiesystemerneuerung verwendet, welche zu Emissionen unter 10 kgCO_{2,eq}/m² führen – Lösungen mit einer Häufigkeit von unter 4 % werden aufgrund der Relevanz eliminiert. Sowohl die deterministische als auch die stochastische Analyse führen bei Erneuerungsmassnahmen zu einem breiten Spektrum an optimalen Lösungen. Der Hauptunterschied liegt jedoch bei den gewählten Energiesystemen, da im stochastischen Fall deutlich weniger Lösungen mit einem Biomassekessel vorkommen als bei den deterministischen Ergebnissen. Stattdessen umfassen die stochastischen Ergebnisse in erster Linie Wärmepumpentechnologien, was vor allem auf die Prognosen für niedrigere Technologiepreise in der Zukunft aufgrund von Technologieverbesserungen, Lernkurven der Industrie usw. zurückzuführen ist.

Deterministische Lösungen

Stochastische Lösungen

MFH					MFH				
Erneuerung	Heizsystem	Sol. System	Batterie	Anteil	Erneuerung	Heizsystem	Sol. System	Batterie	Anteil
Fenster/Außenwand	L/W-WP	PV	x	41 %	Fenster/Außenwand	L/W-WP	PV	✗	13 %
Dach	Biomasse	PV	x	8.2 %	Fenster/Außenwand	S/W-WP	PV	✓	9.5 %
Keine Erneuerung	L/W-WP	PV	x	6.3 %	Fenster/Außenwand	L/W-WP	PV	✓	6.8 %
Fenster	L/W-WP	PV	x	5.0 %	Keine Erneuerung	S/W-WP	PV	✓	6.3 %
Keine Erneuerung	Biomasse	PV	x	4.1 %	Umfassende Erneuerung	L/W-WP	PV	✗	5.4 %
Keine Erneuerung	L/W-WP	PV	x	4.1 %	Fenster/Außenwand	S/W-WP	PV	✗	5.3 %
Dach	L/W-WP	PV	x	3.4 %	Umfassende Erneuerung	S/W-WP	PV	✓	5.2 %
Keine Erneuerung	Biomasse	PV	x	2.8 %	Fenster	Biomasse	PV	✓	4.0 %
Keine Erneuerung	Gas	PV	x	2.5 %					
Fenster/Außenwand	L/W-WP	PV	x	2.2 %					
Fenster/Außenwand	Biomasse	PV	x	2.2 %					

Tabelle 3: Ein Vergleich der typischen deterministischen und robusten Lösungen unter $10 \text{ kgCO}_{2,\text{eq}}/\text{m}^2$. Der Anteil zeigt die gewählte Lösung im jeweiligen Gebäudesegment, hier MFH.

Die durchgeführten Analysen zeigt, dass durchaus $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen unter $10 \text{ kgCO}_{2,\text{eq}}/\text{m}^2$ erreicht werden können – typischerweise bei $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Vermeidungskosten von 200–400 CHF/ $\text{tCO}_{2,\text{eq}}$ gegenüber kostenoptimierten Lösungen. Die technisch-ökonomisch optimalen Lösungen zeichnen sich durch drei Massnahmestrategien auf Gebäudeebene aus: (i) die Gebäudehülle in Bezug auf die Energieeffizienz teilweise verbessern, (ii) der Ersatz von Öl- und Gasheizungen fast vollständig umsetzen und (iii) Einsatz von PV und in einigen Fällen die Installation elektrischer Speicher.

4.3.2 Wirkung auf Quartiersebene

Die Archetypen der Schweizer Quartiere werden mit einer zweistufigen Methode berechnet, welche zunächst die Quartiere der Schweiz [3.3] in die drei urbanen Typen Stadt, Agglomeration und Land einteilt und dann eine Clustering-Methode für jede Quartierskategorie anwendet, welche Gemeinden der Schweiz in Archetypen kategorisiert. Dabei werden Gebäudetypologien, Gebäudealter und Potenzial erneuerbarer Energien in Betracht gezogen. Basierend auf dieser Clustering-Analyse werden zwölf typische Archetypenquartiere identifiziert, für welche die Optimierung des Energiesystems auf Quartiersebene durchgeführt wird. Abbildung 11 zeigt für die 12 Archetypenquartiere die installierten Kapazitäten einzelner Systeme (rötliche Farbtöne zeigen Gebäudetechnologien und bläuliche Farbtöne Quartiersysteme). Die einzelnen Spalten zeigen dabei die Variation an Lösungen je nach erreichtem $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Wert. Ziel ist es herauszufinden, für welche Art von Gebäuden oder Quartieren welche Energiesystemlösungen optimal sind. Die Ergebnisse zeigen, dass Thermische Netze («Fernwärmesysteme») hauptsächlich für städtische und einige suburbane Cluster (Agglomeration) ausgewählt werden, während in ländlichen Gebieten individuelle Energiesysteme bevorzugt werden. Kostenoptimale Lösungen basieren heute oft auf ölbasierten Heizsystemen, die mit strengeren $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Zielen schrittweise

durch Wärmepumpen (sowohl L/W-WP als auch S/W-WP) oder Abwärmenutzung (z.B. Blockheizkraftwerken) ersetzt werden. CO_{2,eq}-optimierte Fälle erfordern einen Mix aus verschiedenen Energiequellen wie Abwärme, Wärmepumpen oder Biomasse. Die Ergebnisse deuten weiter darauf hin, dass in den Städten für 50–80 % und in dichteren bzw. industrialisierten Agglomerations-Gemeinden für bis zu 50 % thermische Netze vorgeschlagen werden. Die Integration von PV ist für alle Quartierskategorien eine in der Optimierung vorkommende Lösung, welche bis zur maximal verfügbaren Kapazität ausgereizt wird. Abbildung 12 zeigt eine Aufstellung der Investitions- und Betriebskosten für Lösungen die das CO_{2,eq}-Ziel erreichen. Die Abbildung zeigt, dass die Investitionskosten für Quartiere mit einer hohen Anzahl an Quartierslösungen zwischen 20 und 25% niedriger sind als für Quartiere mit einer hohen Anzahl an Gebäudesystemlösungen.

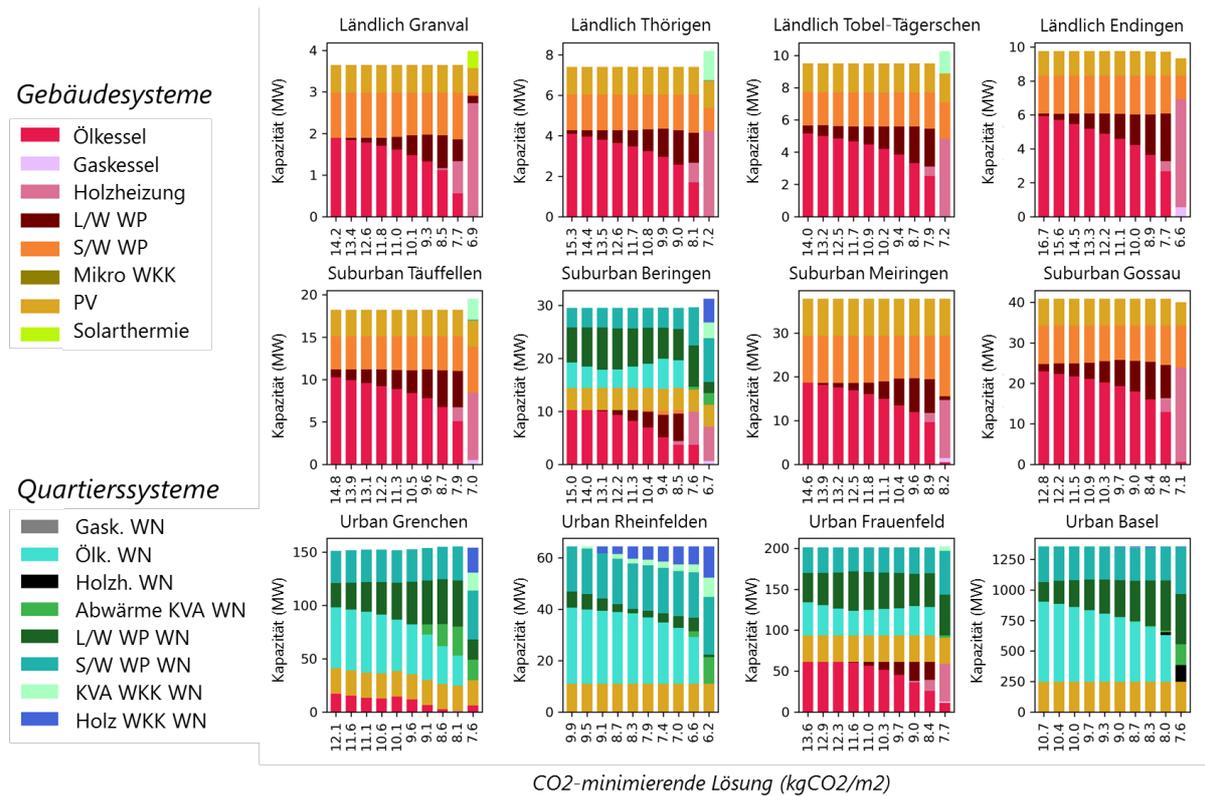


Abbildung 11: Optimale Auswahl des Energiesystems für archetypische Quartiere (ländliche, suburbane und städtische Archetypen)

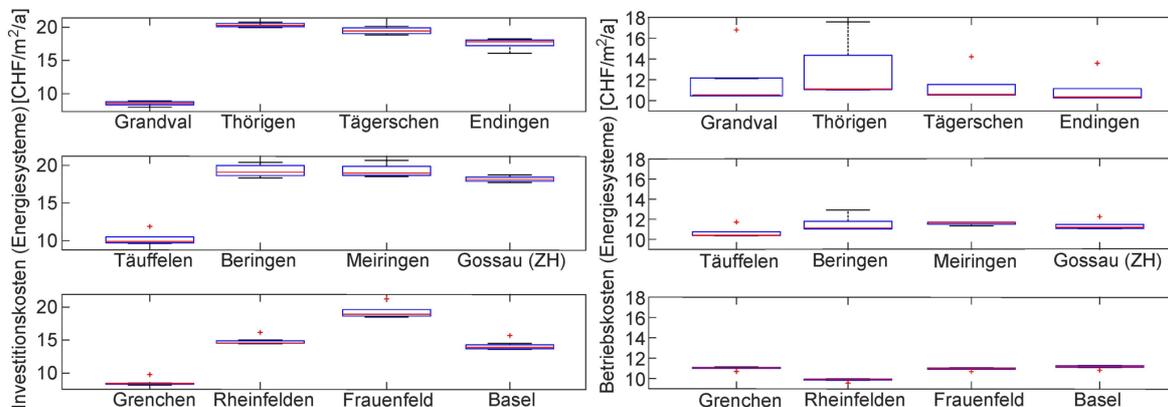


Abbildung 12: Bandbreite der Investitionskosten (links) und Betriebskosten (rechts) für Quartiersenergiesysteme der 12 Archetypen die das Ziel 10 kg CO_{2,eq}/m² erreichen.

Durch die Skalierung der technisch-ökonomisch optimalen Lösungen auf den gesamten Gebäudebestand der Schweiz könnten die CO_{2,eq}-Emissionen um bis zu rund 80 % reduziert werden. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Erreichung des ES2050-Ziels für den Gebäudebestand technisch und wirtschaftlich machbar ist. Welche regulatorischen Massnahmen notwendig sind, wird im nachfolgenden Kapitel erläutert.

4.4 WP4: Massnahmen einer neuen TER

Basierend auf den technischen und wirtschaftlichen Potentialen, welche in den vorangehenden Arbeitspaketen aufgezeigt wurden, werden in diesem WP4 mögliche TER hergeleitet, um die Zielerreichung der ES2050 für den Gebäudepark Schweiz zu unterstützen. Die Vor- und auch Nachteile gegenüber den aktuellen Anforderungen der MuKE:2014 werden am Schluss dieses Kapitels aufgezeigt. Die Umsetzung der vorgeschlagenen TER, wie die Rechtsetzung und der Vollzug, wird in dieser Phase 1 nicht erarbeitet und soll im der Phase 2 des EnTeR Projekts erfolgen.

Die Herleitung der vorgeschlagenen TER basiert auf den Erkenntnissen und Resultaten der vorangegangenen WP1, WP2 und WP3. Im Weiteren wurden Meinungen einer Fachgruppe in der Formulierung möglicher zukünftiger TER mitberücksichtigt.

4.4.1 Identifikation wirksamer Massnahmen

Die Meinung der Fachgruppe, bestehend aus Experten der Energie- und Gebäudetechnik der Hochschule Luzern, wurde an vier Workshops abgeholt. Die einleitende Frage «Welche regulatorischen Massnahmen sind in der Schweiz möglich und nötig, um die Ziele der ES2050 zu erreichen?» wurde am ersten Workshop intensiv diskutiert und die verschiedenen Meinungen wurden gruppiert. In Übereinstimmung mit der Literaturrecherche in WP1 sind nachfolgend die häufigsten Antworten der Fachgruppe auf diese Frage aufgeführt:

- von fossilen Brennstoffen zu erneuerbaren Energiequellen wechseln
- Anreize schaffen, den Bestand zu erneuern
- Energieeffizienz steigern
- gesetzlicher Vollzug auf Lebenszyklus der Immobilie (Planung, Bau und Betrieb) abstimmen
- Nutzer als Mitverursacher (Betrieb) mehr einbinden

Vor Beginn der Diskussionen mit der Fachgruppe wurden technische Massnahmen und Massnahmenpakete aus vorhandenen Gesetzen, Normen, Reglementen und Studien [u.a. 4.2, 4.3, 4.4] recherchiert. Diese wurden daraufhin der Fachgruppe mit dem Ziel vorgelegt, diese zu vervollständigen und zu bewerten. Die Bewertung erfolgte nach dem Prinzip des hedonistischen Kalküls [4.1]. Die Wirkung der Massnahmenpakete auf Umbau- und Neubauprojekte wurde für ein ideales Umfeld beurteilt, d.h. dass genügend Platz im und um das Gebäude vorhanden ist, genügend Ressourcen zur Verfügung stehen und es keine Einschränkungen für technische Einrichtungen gibt (siehe Abbildung 13).

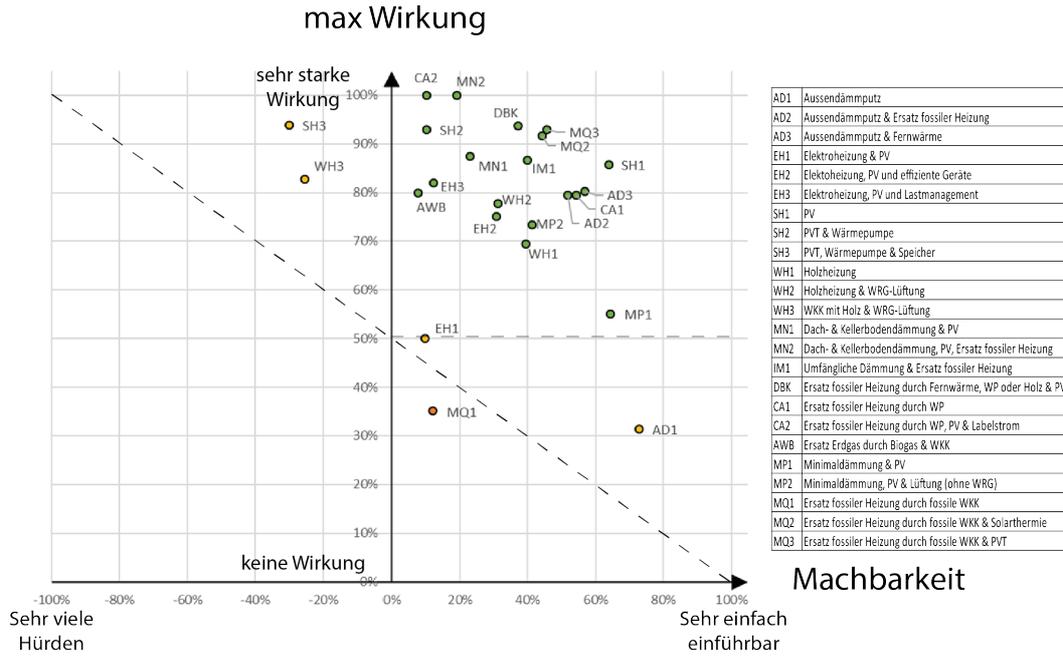


Abbildung 13: Bewertung von technischen Massnahmenpaketen für das 'ideale' Umfeld. Die einzelnen Massnahmenpakete sind dabei als Punkte aufgezeichnet und mit ihrem entsprechenden Code benannt. Die Massnahmenpakete sind im Bericht WP4, Kapitel 11.3 im Detail erläutert. Auf der Ordinate wird die Wirkung aufgeführt. 0% bedeutet, dass gegenüber der heutigen Situation keine Verbesserung der CO₂,eq-Emissionen und Energieeffizienz erwartet wird, 100% bedeutet, dass durch das Massnahmenpaket eine sehr starke CO₂,eq-Reduktion und eine stark erhöhte Energieeffizienz des Gebäudes erwartet wird. Auf der Abszisse ist die Machbarkeit aufgeführt. Wird die Umsetzung als einfach machbar bewertet, liegt die Machbarkeit bei 100%, halten sich die positiven und negativen Bewertungen die Waage, liegt die Machbarkeit bei 0%. Sind bei der Umsetzung beträchtliche soziale, technische oder andere Hemmnisse zu erwarten, ist die Machbarkeit mit -100% bewertet.

Die Massnahmenpakete wurden auch für ein typisches Umfeld bewertet was bedeutet, dass z. B. nicht überall genügend Platz für eine PV-Anlage vorhanden ist oder keine Erdwärmesonden geteuft werden können (siehe Abbildung 14).

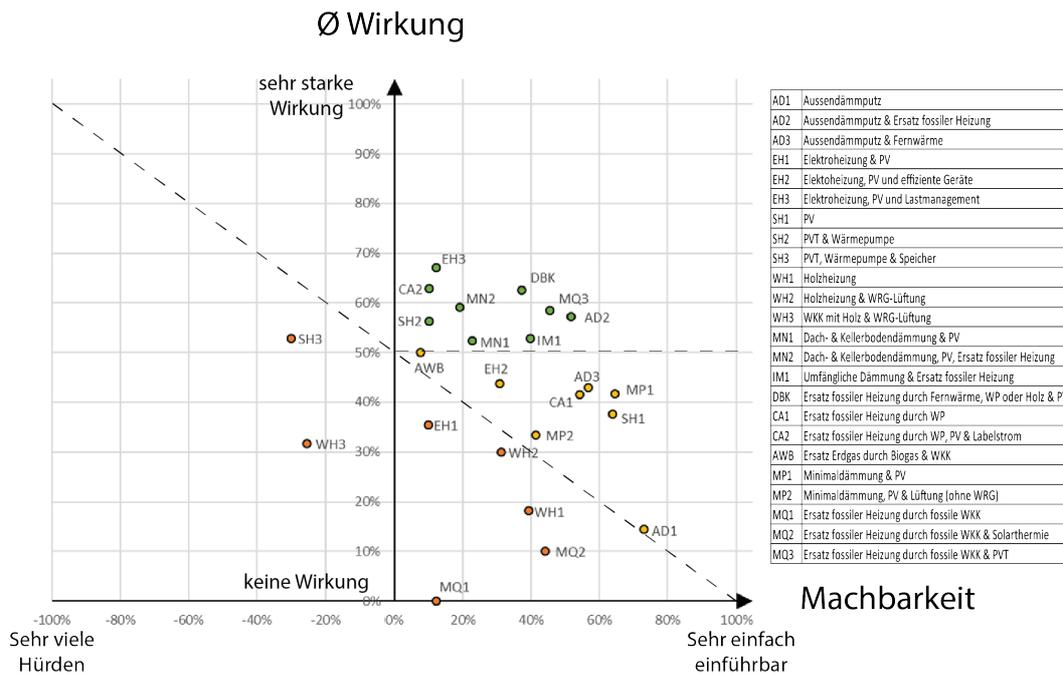


Abbildung 14: Bewertung von technischen Massnahmenpaketen für ein 'typisches' Umfeld.

Abbildung 13 und 14 zeigen eine Zusammenfassung der Bewertung aller vorgeschlagenen Massnahmenpakete. Grün eingefärbt sind Massnahmenpakete, welche die Fachgruppe als überdurchschnittlich wirksam erachtet (Wirkung >50 %) und gleichzeitig als eher einfach umsetzbar einschätzt (Machbarkeit >0%). Gelb eingefärbte Massnahmenpakete zeigen entweder eine unterdurchschnittliche Wirkung (<50%) mit guter Machbarkeit (>0%) oder sind schwierig umzusetzen (<0%), haben aber eine gute Wirkung (>50%). Sie befinden sich alle oberhalb der Diagonalen in Abbildung 13 und 14, welche die Grenze der Ausgewogenheit zwischen Wirkung und Machbarkeit darstellt. Alle Massnahmenpakete, für welche eine eher schlechte Machbarkeit mit kleiner Wirkung prognostiziert wird und die somit unterhalb dieser Diagonalen angesiedelt sind, wurden rot eingefärbt.

Auffällig ist, dass viele der vorgeschlagenen Massnahmenpakete zumindest für ein ideales Umfeld gut geeignet sind. Jedoch auf den gesamten Gebäudepark angewendet, nimmt die Wirkung und Machbarkeit ab. Durch die Analyse der Rückmeldungen aus der Fachgruppe konnten die Massnahmen identifiziert werden, welche oft in Massnahmenpaketen vorkommen und als besonders wirksam und leicht machbar eingeschätzt wurden:

- Ersatz von Öl-/Gaskessel durch Wärmepumpen oder Biomassenkessel
- Wirtschaftliche, partielle Erneuerung der Gebäudehülle um die Schadensfreiheit zu garantieren oder den Komfort und die Energieeffizienz zu erhöhen.
- Einsatz von PV-Anlagen.
- Anschluss an ein thermisches Netz (Nah-/Fernwärme, zum Heizen und Kühlen).
- Energieeffiziente Betriebseinrichtungen (elektrische Geräte, Beleuchtung, Lüftungsgeräte etc.).

Kontrovers wurde die Erneuerung der Gebäudehülle diskutiert. Bei einer wirtschaftlichen Aufwertung der Gebäudehülle wird das Bauteil so gedämmt, dass Schadensfreiheit garantiert wird. Grundlage bildet dabei die SIA 180, welche in Tabelle 7 maximale Wärmedurchgangskoeffizienten (U_{max}) definiert mit welchen eine Schadensfreiheit einhergeht. Die Fachgruppe erwartet dadurch eine grössere Akzeptanz zur heutigen Praxis mit deutlich tieferen U-Werten. Der Grund dafür liegt einerseits in der höheren Freiheit bei der Ausgestaltung und andererseits bei tieferen Investitionen und Raumverlust bei Innendämmung. Die Energieeffizienz eines einzelnen Gebäudes wird mit dieser tieferen Anforderung an die Wärmedämmung nicht maximal ausgeschöpft. Jedoch wird erwartet, dass durch die weniger ambitionösen Anforderungen die Erneuerungsrate steigt. Auf den gesamten Gebäudepark bezogen wird die Energieeffizienz trotz tieferen Anforderungen erhöht (siehe auch Resultate WP2 und WP3).

Technische Massnahmen und Massnahmenpakete zeigen ganzheitliche Lösungen zur Erhöhung der Energieeffizienz und/oder Reduktion von $CO_{2,eq}$ -Emissionen. Technologiespezifische Massnahmen, wie z. B. eine Aussenwanddämmung, sind spezifische Lösungen und lassen dem Planer wenig Spielraum in der Umsetzung. Hingegen haben solche Massnahmen den Vorteil, dass die möglichen Lösungen bekannt sind und einfach umgesetzt werden können. Um jedoch Raum für Innovation zu schaffen, wo neue technische Ansätze mit gleicher oder verbesserter Wirkung entstehen können, sollen neue Regulierungen technologieoffen formuliert werden. Daher wurde zu jeder oben erwähnten technischen Massnahme eine Leitgrösse definiert, mit welcher die Umsetzung der Massnahme beeinflusst werden kann. Die Leitgrössen wurden in acht Kategorien eingeteilt:

- Flächen (Hülle, Geschoss, etc.)
- Volumen (Gebäudevolumen, Volumen Zonenplan, ober-/unterirdisch, etc.)
- **Energie** (Primär-, End-, Nutzenergie, etc.)
- **Leistung** (Bezugsleistung, Anschlussleistung, etc.)
- Personen/Nutzung (Belegung, Anzahl, Tätigkeit, etc.)
- Zeit (Lebensbauer, Betriebsbauer etc.)
- **Emissionen** ($CO_{2,eq}$, 'graue' Treibhausgase, etc.)
- **Masse** (Baukonstruktion, thermisch aktiv, etc.)

Die Zuordnung der Leitgrößen zu den jeweiligen technischen Massnahmen (siehe auch Matrix Bericht WP4, Kapitel 11.5) zeigte, dass Energie, Leistung, Emissionen und Masse am meisten verwendet wurden um technische Massnahmen zu fördern oder zu hemmen.

Die Workshops zeigten auf, dass verschiedene Leitgrößen notwendig sind, um gleichzeitig die Energieeffizienz zu steigern, den Einsatz von erneuerbaren Energien zu erhöhen und die CO_{2,eq}-Emissionen zu reduzieren. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Es existiert keine alleinige Leitgrösse, wie z.B. CO_{2,eq}-Emissionen von Gebäuden, um die Anforderungen rund um die Gebäudeenergie zu regulieren. Die Regulierung der Energieeffizienz von Gebäuden, welche einen direkten Einfluss auf die Energiemenge und somit auf die Versorgungssicherheit/-unabhängigkeit hat, muss ebenfalls in einer zukünftigen TER Platz finden. Diese Aussage steht im Einklang mit den Resultaten aus WP1, siehe oben 4.1.2.
- Folgende drei TER Konzepte werden als wirkungsvoll erachtet, um Energie und CO_{2,eq}-Emissionen technologieoffen zu regulieren:
 - o die Regulierung des Eigenverbrauchs (thermisch und elektrisch),
 - o die Regulierung der Leistung (Wirkung auf die Infrastruktur und Bereitstellung erneuerbarer Energie) und
 - o die Regulierung der Nutzung (Wirkung auf die Energieeffizienz bzw. den Betrieb).

4.4.2 Herleitung von TER

Die identifizierten Massnahmen und die Resultate aus vorangehenden Arbeitspaketen zeigen auf, dass mehrere Ansatzpunkte für TER gewählt werden müssen, um die umfassenden energie- und klimapolitischen Ziele der Schweiz (Energieeffizienz steigern, Anteil erneuerbarer Energien erhöhen und Treibhausgasemissionen senken) abzudecken. Folglich wird eine Aufteilung der Massnahmen in die drei Hauptphasen des Lebenszyklus' einer Immobilie vorgeschlagen: Erstellung, Betrieb und Rückbau. Für jede dieser Phasen wird ein spezifisches TER Konzept vorgeschlagen:

1. Für die Erstellung (Planungs- und Bauphase) wird die TER «**Leistungsgrenze**» vorgeschlagen. Daten aus WP3 zeigen auf, dass die Summenhäufigkeitskurven des Leistungsbedarfs bei Standardnutzung der jeweiligen Gebäudetypen ähnlich sind. Folglich repräsentiert der maximale Leistungsbedarf auch die Energieeffizienz eines Gebäudes. Mit der Leistungsgrenze für Heizung, Kühlung und Elektrizität werden bauliche Massnahmen an der Gebäudehülle, Gebäudestruktur und Gebäudetechnik durchgesetzt, um einen energieeffizienten Betrieb zu ermöglichen. Im Weiteren wirkt die Leistungsbegrenzung auf die Energieversorgungsanlagen ausserhalb des Gebäudes. Die Belastung der Netzinfrastrukturen und die Bereitstellung von Reservekapazitäten für die Strom-, Wärme-, und Gasversorgung werden mit einer solche TER positiv beeinflusst.
2. Der Betrieb eines Gebäudes bestimmt den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen massgeblich (siehe Resultate WP2). Mit der vorgeschlagenen TER «**Energiemix**» wird die Menge der erlaubten CO_{2,eq}-Emissionen begrenzt, welche während dem Betrieb eines Gebäudes anfallen. Weil eine Beschränkung der Treibhausgasemissionen sowohl durch die Wahl von Energieträgern mit geringere Emissionsintensität als auch durch eine Senkung des Energiebezugs erreicht werden kann, erlaubt diese TER eine Vielzahl von Möglichkeiten, um einen Grenzwert des Energiemixes einzuhalten.
3. Der indirekte Anteil des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen, welche durch ein Gebäude verursacht werden, fällt durch die verwendeten Baumaterialien in Form von grauer Energie bzw. grauen Emissionen an. WP3 zeigt auf, dass der Anteil nicht-betrieblicher Emissionen bis zu 40% der gesamten Emissionen über den Lebenszyklus eines Gebäudes ausmachen kann. Die vorgeschlagene TER «**Materialzyklus**» soll diesen ‚grauen‘ Anteil reduzieren indem eine Recyclinggebühr

auf Baumaterialien erhoben wird. Damit wird ein Anreiz geschaffen, Baumaterialien wieder zu verwenden, zu verwerten oder zu kompostieren. Eine umfassende Einführung von Recycling in der Bauindustrie ermöglicht neue, innovative Produkt- und Prozessentwicklungen. Werden Materialkreisläufe geschlossen, hat dies eine positive Wirkung sowohl auf die Energieeffizienz als auch auf die Ressourceneffizienz der Baumaterialien. Dies vor allem im Hinblick darauf, dass die Bauindustrie ebenfalls dekarbonisiert wird.

Die drei präsentierten TER können auch mathematisch hergeleitet werden, siehe dazu Teilbericht WP4, Kapitel 7. Die Herleitung zeigte auf, weshalb der maximale Leistungsbezug, die Begrenzung der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen im Betrieb und das Recycling von Baumaterialien eine bedeutende Rolle in der Reduktion des $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Fussabdrucks eines Gebäudes spielen:

$$M_{\text{CO}_2\text{tot}} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot x_{\text{CO}_2,E,i} \cdot (1 - r_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=y}^l m_i \cdot P_{s,ik} \cdot \varepsilon_{\text{CO}_2,B,jk} \cdot t_{jk} \quad (1)$$

$M_{\text{CO}_2\text{tot}}$: $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Fussabdruck eines Gebäudes $[\text{kg}_{\text{CO}_2,\text{eq}}]$

m : Masse des verwendeten Baumaterials $[\text{kg}]$

$x_{\text{CO}_2,E}$: Spezifische graue Emissionen des verwendeten Baumaterials $[\text{kg}_{\text{CO}_2,\text{eq}}/\text{kg}]$

r : Recyclingrate $[-]$

P_s : Spezifischer thermischer, elektrischer oder chemischer Leistungsbezug (bezogen auf Masse des Baumaterials) $[\text{kW}/\text{kg}]$

$\varepsilon_{\text{CO}_2,B}$: Emissionsfaktor des Energiemix $[\text{kg}_{\text{CO}_2,\text{eq}}/\text{kWh}]$

t : Betriebsdauer $[\text{h}]$

i, n : Anzahl der verwendeten Bauelemente $[-]$

j, m : Anzahl Energieträger $[-]$

k, l : Anzahl Zeitintervalle ($y = 1; 0,25; \dots \rightarrow \text{Jahr, Monat, Stunde, 15min, etc.}$) $[-]$

Das Ziel der neuen TER ist es, den $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Fussabdruck der Gebäude zu reduzieren, deren Energieeffizienz zu erhöhen und eine grosse Freiheit in der Lösungswahl zu lassen um Raum für technische Innovationen zu schaffen. Die strukturellen und technischen Möglichkeiten am Gebäude, welches durch die Gebäudemasse (m) in Gleichung (1) repräsentiert wird, bieten einen grossen Handlungsspielraum durch die Wahl, das Konzept und die Verarbeitung der Materialien für Bauherren, Planer und Ausführende. Der Betrieb eines Gebäudes, welcher massgeblich durch (t) bestimmt ist, wird durch die Nutzer beeinflusst und kann nur schlecht durch eine technische Regulierung begrenzt werden. Um Nutzer wirksam zu beeinflussen wären sozioökonomische Regulierungen effektiver. Folglich sollten (m) und (t) nicht durch TER begrenzt werden.

Hingegen kann gemäss Gleichung (1) der Term ($x_{\text{CO}_2,E} \cdot (1 - r)$) reduziert werden, indem Baumaterialien mit geringeren spezifischen grauen Emissionen gewählt oder indem die Recyclingraten der verwendeten Materialien erhöht werden (TER «Materialzyklus»). Die Grösse ($\varepsilon_{\text{CO}_2,B}$), d.h. der 'Emissionsfaktor des Energiemix', kann durch die Wahl des Energieträgers beeinflusst werden (TER «Energiemix»). Die Grösse (P_s), der 'spezifische thermische, elektrische oder chemische Leistungsbezug', kann durch die Wahl des Gebäudeenergiekonzepts verändert werden (TER «Leistungsgrenze»).

Die beiden Grössen ($\varepsilon_{\text{CO}_2,B}$) und (P_s) können durch TER wirkungsvoll begrenzt werden, das zeigen ebenfalls die bestehenden TER, welche in WP1 analysiert wurden (siehe Vorreiterländer Bericht WP1, Tabelle 2). Für die Minimierung des Terms ($x_{\text{CO}_2,E} \cdot (1 - r)$) wurden bisher jedoch nur sehr wenige effektive TER definiert. Einzig Frankreich testet momentan Regulierungen zur Beschränkung der grauen Treibhausgasemissionen (siehe WP1). Wirtschaftliche Anreize, wie z. B. die Einführung einer Recyclinggebühr auf Baumaterialien versprechen wirkungsvolle Änderungen in Bauprozessen, wenn sie von geeigneten regulatorischen Rahmenbedingungen begleitet werden (siehe z.B. Rücknahmeverpflichtung von Elektroschrott).

4.4.3 Vergleich zur MuKE:2014

Mit der MuKE:2014 werden überwiegend Anforderungen an den jährlichen Energiebedarf und somit an die Energieeffizienz gestellt. Nur wenige bzw. nicht ambitionierte Anforderungen zielen auf den Einsatz von erneuerbaren Energien ab und Anforderungen an einen Materialzyklus fehlen gänzlich. Die Wirkung solcher Anforderungen entfaltet sich bei Neubauten oder wenn ein Gebäude erneuert (z. B. Wärmedämmung der Hülle, Fensterersatz, etc.) oder Komponenten (z. B. Wärmeerzeugung) ersetzt werden müssen. Der Nachweis dieser Anforderungen erfolgt vor Baubeginn wobei der Entscheid, wann eine Modernisierung ins Auge gefasst wird, frei wählbar ist. Grossverbraucher können von den Anforderungen entbunden werden, wenn sie eine Zielvereinbarung zur schrittweisen Senkung des Endenergiebezugs mit dem Kanton vereinbaren. Ein Grossverbraucher muss jährlichen einen Wärmeverbrauch von mehr als 5 GWh oder einen jährlichen Elektrizitätsverbrauch von mehr als 0.5 GWh ausweisen können. Dieser Nachweis erfolgt in der Betriebsphase aufgrund von Messwerten.

Die Rechtsetzung der vorgeschlagenen TER erfolgt erst in der nächsten Phase (Phase 2) des EnTeR Projekts, d.h. es sind nicht alle Details der Umsetzung und des Vollzugs heute schon bekannt. Ein Vergleich der vorgeschlagenen TER mit der MuKE:2014 erfolgt auf Konzeptebene.

Die TER «Leistungsgrenze» zielt auf die Energieeffizienz ab und deckt sich somit gut mit den Anforderungen der MuKE:2014. Neu steht aber nicht der jährliche Energiebedarf im Vordergrund, sondern die Leistung. Erwartet wird hier die gleiche Wirkung wie mit der heutigen Praxis, aufgrund der Energieberechnung mit Standardnutzungsdaten. Der Nachweis kann wie schon heute mit Standardlösungskombinationen oder mit Systemnachweis erfolgen. Bei einer Berechnung wird anstelle der SIA 380/1 die SIA 384.201 und bei klimatisierten Gebäuden die SIA 382/2 angewendet. Mit der Einführung der Heizleistung für Wohn-, Büro und Schulbauten kennt die MuKE:2014 schon heute eine Anforderung an die Leistung. Zu erwartende Vorteile einer Leistungsbetrachtung anstelle einer Energiebetrachtung sind folgende:

- Durch den Klimawandel wird der Heizenergiebedarf reduziert und der Kühlenergiebedarf nimmt zu. Durch extreme Wettersituationen bleibt hingegen die notwendige Leistung im Winter wie auch im Sommer nach wie vor hoch. Die Begrenzung der Leistung ist in der Zukunft effektiver, um energieeffiziente Gebäude durch zu setzen.
- Die Leistungsberechnung ist unabhängig von der Nutzung und beurteilt die Baukonstruktion.
- Die berechnete Leistung bildet die Grundlage für die Auslegung der Wärme- und Kälteanlagen, somit kann die Einhaltung nach Erstellung der Anlagen einfach überprüft werden.
- Die nahestehenden Sektoren Energieversorgung (Strom, Wärme und Gas) sowie Mobilität kann ebenfalls durch eine Leistungsbegrenzung positiv beeinflusst werden, d.h. Reduktion von Netz- und Reservekapazität und Ausbau von Energiespeicher.

Neben den Vorteilen sind auch die Nachteile zu benennen:

- Die Abgrenzung der Prozessleistung bei Heiz- und Kälteanlagen muss im Vollzug speziell beachtet werden.
- Bei einer Stückholz-Heizung wird die Leistung nicht nach dem Wärmeleistungsbedarf ausgelegt, sondern nach der Abbrandmenge angegeben. Dies muss ebenfalls im Vollzug berücksichtigt werden.

Mit der TER «Energimix» sollen die CO_{2,eq}-Emissionen im Betrieb eingeschränkt werden. In der MuKE:2014 existiert keine vergleichbare Anforderung. Diese TER hat aber grosse Ähnlichkeit mit dem Basismodul Teil L «Grossverbraucher» der MuKE:2014. Die Anforderung bezieht sich auf den Betrieb, die Basis bilden Messwerte. Die MuKE-Regulierung beschränkt sich nicht auf ein Gebäude, sondern Grossverbraucher können sich zu Gruppen zusammenschliessen.

Die TER «Energimix» soll für alle Gebäude eingeführt werden. Folgende Vorteile werden erwartet:

- Beurteilung der effektiven CO_{2,eq}-Emissionen im Betrieb und Reduktion des ‚Performance Gap‘, d.h. keine Rückschlüsse auf den Betrieb mittels standardisierten Planungsdaten.
- Hohe Freiheit in der Lösungsfindung, durch die Wahl der Energieträger, Senkung des Energieverbrauchs und/oder Erhöhung der Eigenproduktion von erneuerbarer Energie.

Nachteile der TER sind:

- Aufwändiger Vollzug, aufgrund der Beurteilung von Verbrauchsdaten (ev. Einsatz von neue Vollzugsmethoden, wie automatische Datenanalysen).
- Zusätzlicher Aufwand für die Erfassung des Energieverbrauchs (Smart Meter).

Durch immer energieeffizientere Gebäude nimmt der Anteil der grauen Emissionen und grauen Energie vom Baumaterialien stetig zu (siehe auch Erkenntnisse WP3) und soll daher mit der TER «Materialzyklus» auch reglementiert werden. Die MuKE:2014 stellt bis heute keine Anforderungen an die grauen Emissionen oder graue Energie. Bei der Zertifizierung nach Minergie-ECO, 2000 Watt-Gesellschaft oder SNBS werden entsprechende Anforderungen formuliert. Die Berechnung ist aufwendig oder basiert auf Standardwerten, die stark vom gebauten Gebäude abweichen. Mit dem vorgeschlagenen Gebührensystem auf Baumaterialien werden diese Schwierigkeiten umgangen. Zudem wird dadurch ein Anreiz geschaffen, Baumaterialien wiederzuverwenden, zu verwerten oder zu kompostieren. Entscheidend für eine erfolgreiche Umsetzung sind der Zeitpunkt der Gebührenpflicht und die Verwaltung der Einnahmen. Der Unterschied zu den heute bekannten Systemen wie Elektroschrott und PET ist die Lebensdauer, das Gewicht und die lokalen Märkte. In nachfolgenden Arbeiten muss eine Einführung und Umsetzung einer solchen Gebührensystems im Detail ausgearbeitet werden.

Anhand eines Absenkpades für die Leistungsgrenzen und der Energiemixgrenzwerte könnte die zukünftige TER zusätzlich eine höhere Dynamik erreichen. Die Grenzwerte könnten jährlich gesenkt werden, z.B. 2% pro Jahr oder stetig steigende jährliche Absenkung über 5 bis 10 Jahre (1. Jahr – Senkung um 0.5%, 2. Jahr – Senkung um 1.5%, 3. Jahr – Senkung um 3% etc.). Damit kann die Erneuerung bestehender Gebäude forciert werden. Je länger bei einem bestehenden Gebäude mit der Erneuerung zugewartet wird, desto anspruchsvoller wird die Erfüllung der Grenzwerte und folglich der Eingriff am Gebäude. Im Weiteren kann durch einen Absenkpfad der Bauindustrie eine hohe Sicherheit über zukünftige Rahmenbedingungen gegeben werden. Dies fördert Investitionen in Innovation (siehe auch WP1).

Nachfolgend werden die vorgeschlagenen TERs «Leistungsgrenze», «Energimix» und «Materialzyklus» anhand einer SWOT-Analyse der heutigen MuKE:2014 gegenübergestellt (siehe Tabelle 4).

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> - Vereinfachung durch getrennte Betrachtung der Phasen Planung/Bau, Betrieb und Rückbau (Materialien) - Die geforderten Leistungen sind im Vollzug einfach überprüfbar - Durch die Festlegung der Anforderungen als Absenkpfade, hohe Planungssicherheit und Innovationsförderung für zukünftige Lösungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Die Berechnung der Grenzwerte bzw. Preise (TER «Materialzyklus») ist ein schwieriger Prozess. Insbesondere deren Grössen bis weit in die Zukunft zu bestimmen (siehe auch Absenkpfad) - Prüfung und Beurteilung des Energiebezugs erfordert Fachwissen und neue Anforderung an den Vollzug (Datamanagement)
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> - Berücksichtigung der Baumaterialien - Involvierung der Nutzer und Anreize für Betriebsoptimierungen - Berücksichtigung der Anforderungen naheliegender Sektoren (Strom, Gas, Wärme) - Motivation Speicher einzusetzen und zu bewirtschaften 	<ul style="list-style-type: none"> - Die Umstellung auf die neuen TER braucht eine breite Unterstützung in der gesamten Baubranche - Der Vollzug beim Energiemix braucht eine neue Rechtssetzung (z.B. Pönalisierung über Steuern) - Privatsphäre und Datenschutz durch die Datenerhebung

Tabelle 4: SWOT-Analyse des vorgeschlagenen TER-Konzepts gegenüber der MuKE:2014

5 Fazit

Die Anwendung einer Lebenszyklus-Perspektive erlaubt die wirkungsvollsten Massnahmen bzw. Stellschrauben in den drei Hauptphasen (Bau, Betrieb und Rückbau) einer Immobilie zu identifizieren. Durch diese Aufteilung kann eine TER spezifisch auf die Akteure, welche direkten Einfluss auf die jeweilige Phase haben, ausgerichtet werden.

In der Bauphase, welche sowohl Renovationen und Neubauten umfasst, wird die Energieeffizienz durch die Konstruktion, Materialisierung und Technisierung beeinflusst. Die Energieeffizienz eines Gebäudes setzt sich wiederum aus der Leistung und deren Betriebscharakteristik zusammen. Der Leistungsbedarf kann durch die beim Bau involvierten Akteure, wie Bauherr, Investor, Planer und Ausführende, direkt beeinflusst werden. Hingegen können diese Akteure nur beschränkt später auf den Betrieb Einfluss nehmen, da sie dann nicht mehr in der Verantwortung stehen. Die Fokussierung auf die Leistungsbegrenzung in der TER nimmt Bezug auf diesen Sachverhalt. Im Weiteren kann mit diesem Kriterium eine Vereinfachung der Umsetzung und Erweiterung des Wirkkreises (Systemgrenzen) einer TER erreicht werden:

- Vereinfachung: Die Berechnung der Leistung beschränkt sich ausschliesslich auf die Konstruktion, Materialwahl und Gerätewahl. Betriebliche Annahmen wie Solargewinne, Abwärme, Raumtemperaturen, etc. können vernachlässigt werden. Vor allem bei der Sanierung von Gebäuden geht es in erster Linie darum ein neues Heizsystem zu bestimmen bzw. die Gebäudehülle zu verbessern. Diese baulichen Massnahmen können wirkungsvoll durch eine Leistungsbegrenzung gelenkt werden. Der Vollzug kann ähnlich wie bisher mit der Überprüfung der Einhaltung des Grenzwertes während der Planung erfolgen bzw. (einfacher) während des Baus, indem die Leistungsdaten der installierten Anlagen geprüft werden.
- Erweiterung: Die Umstellung des Energiesystems auf erneuerbare Energieträger ist eine Herausforderung vor allem für die Infrastrukturen Strom, Gas, Wärme und somit für die Leistungsbereitstellung und -verteilung. Mit der Begrenzung der Leistung beim Gebäude kann direkt Einfluss auf die

Anforderungen der Infrastruktur genommen werden, indem Netzkapazitäten sowie Reservekapazitäten begrenzt werden und folglich auch die Versorgungssicherheit erhöht wird. Erfolgt die Energieversorgung zukünftig ausschliesslich mittels erneuerbarer Energien, tendieren die Grenzkosten gegen Null (Rifkin, J., The zero marginal cost society, 2014). Somit wird die Leistung die dominierende Grösse, auch in den Geschäftsmodellen der Energieversorgung.

In der Betriebsphase können die Nutzer (Mieter, Hauseigentümer, etc.) die Energieeffizienz am wirkungsvollsten beeinflussen. Durch die Betriebscharakteristik des Gebäudes wird die Energiemenge beeinflusst. Um die Qualität dieser genutzten Energieflüsse zu berücksichtigen sollen die verursachten CO_{2,eq}-Emissionen beurteilt werden. Der Nutzer kann die CO_{2,eq}-Grenzwerte einhalten indem er seinen Verbrauch reduziert, CO_{2,eq}-arme/freie Energieprodukte wählt und/oder seine Eigenproduktion z.B. PV, Wärme-Kraft-Kopplung, passive Solarnutzung, Abwärmenutzung, etc. erhöht.

In der Rückbauphase zeigt sich, wie stark der Umwelteinfluss durch die in der Bauphase gewählten und verwendeten Materialien ist. Materialien können wiederverwendet, verwertet, kompostiert oder deponiert werden. Letzteres nutzt die investierten Ressourcen nicht weiter und sollte vermieden werden. Die anderen drei Recyclingarten zeigen die Möglichkeiten der Ressourcennutzung in der Kreislaufwirtschaft. Die Herausforderung besteht darin die Materialien energie- und CO_{2,eq}-arm/frei im Kreislauf zu halten. Ausgehend davon, dass sich die Bauindustrie ebenfalls dekarbonisieren muss, sollen vor allem Anreize geschaffen werden die Materialien im Kreislauf zu halten. Diese Anreize können eher nur auf umständliche Art und Weise mittels einer TER geschaffen werden (siehe internationale Analyse, WP1). Aus diesem Grund wird ein monetärer Ansatz vorgeschlagen: Erheben einer Recyclinggebühr auf Baumaterialien. Dies schafft beim Eigentümer den Anreiz seine Materialien zurückzuführen und die Industrie bekommt einen Anreiz Recyclingprozesse aufzubauen.

Die vorgeschlagenen Massnahmen Leistungsbegrenzung und Energiemix sind 'performance-basiert' und technologieoffen. Im Weiteren erlauben die beiden Massnahmen marktwirtschaftliche und politische Effekte zu berücksichtigen. Abhängig von Energiepreisen, Verfügbarkeit, Lenkungsabgaben, etc. können die betroffenen Akteure die Einhaltung der Grenzwerte ökonomisch optimieren (siehe auch Pareto Fronten, WP3).

Im Gegensatz zur Massnahme Recyclinggebühr auf Baumaterialien können die beiden Massnahmen Leistungsbegrenzung und Energiemix in eine zukünftige TER integriert werden. Damit wird der erfolgreiche Weg der schweizerischen TER weiterbeschritten, jedoch angepasst auf die kommenden Herausforderungen für den Umbau des Energiesystems.

6 Ausblick

Die vorliegende Arbeit (Phase 1) fokussierte auf die energietechnische Regulierung. Weiterführende rechtliche Instrumente, z.B. Raumplanung, Subventions- und Abgaberecht, waren nicht Gegenstand dieses ersten Teils. Eine Abstimmung solcher weiterführenden Instrumente mit der zukünftigen TER ist sinnvoll um eine möglichst grosse Wirkung zu erreichen. Im Weiteren sollte auch die Ermittlung der Steuerwirkung der verschiedenen Regulierungsinstrumente untersucht und ggf. aufeinander abgestimmt werden. Damit werden ganzheitliche Voraussetzungen geschaffen, um die Ziele der ES2050 aus regulatorischer Sicht volkswirtschaftlich günstig zu erreichen.

Mit den zusätzlichen, oben aufgeführten Instrumenten könnten die technischen und wirtschaftlichen Potentiale von Quartier- und Areallösungen umfassender genutzt werden. Die vorgeschlagenen performance-basierten Massnahmen «Leistungsbegrenzung» und «Energiemix» für Gebäude können sinngemäss auf Quartiere und Areale angewendet werden. Die Raumplanung mit deren Energieplanung könnte ergänzende Anreize schaffen, um Quartier- und Areallösungen zu forcieren.

Im Weiteren beschränkte sich diese Arbeit auf die Herleitung von wirkungsvollen Massnahmen für eine zukünftige TER. Die Möglichkeiten der Umsetzung bzw. Durchsetzung der vorgeschlagenen Massnahmen wurde nur im Vergleich zur aktuellen MuKE:2014 aufgezeigt. Die Weiterentwicklung des Vollzugs unter Berücksichtigung neuer Möglichkeiten zur Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten erlaubt eine griffige, wirkungsorientierte TER. So könnten z.B. Messwerte dank der flächendeckenden Anwendung von Smart-Meter mit anwendungsorientierter zeitlicher Auflösung für die Sanktionierung von Grenzwertüberschreitungen oder auch als Bonus von Grenzwertunterschreitungen genutzt werden.

Einen weiteren Aspekt für eine wirkungsvolle TER könnten verbindliche Reduktions- bzw. Absenkpfade für Grenzwerte bilden. Der Gesetzgeber bindet sich dadurch auf längere Frist und schränkt seinen Handlungsspielraum ein. Dafür können Eigentümer sich auf die kommenden Grenzwerte vorbereiten und ihren wirtschaftlich optimalen Zeitpunkt der Erneuerung wählen. Die Bauindustrie erhält Sicherheit für deren Produkte- und Dienstleistungsentwicklung indem diese auf unterstützende Regulierungen treffen (innovationsfördernd).

Die oben aufgeführten Ausblicke sind nicht abschliessend zu verstehen und zeigen den Bedarf für eine weiterführende Studie (Phase 2).

7 Dank

Dieses Forschungsprojekt wurde im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms „Energiewende“ (NFP 70) des Schweizerischen Nationalfonds (SNF) durchgeführt. Weitere Informationen zum Nationalen Forschungsprogramm sind auf www.nfp70.ch oder dem Webportal www.nfp-energie.ch zu finden.

Die finanzielle Unterstützung erfolgte durch den SNF und die EnDK sowie indirekt durch die Schweizerische Agentur für Innovationsförderung Innosuisse im Rahmen des Schweizerischen Kompetenzzentrums für Energieforschung SCCER FEEB&D. Zusätzlich zu diesen Drittmitteln haben die beteiligten Forschungspartner signifikante Eigenmittel ins Projekt investiert.

Die aktive Teilnahme der Mitglieder der Begleitgruppe (Adrian Altenburger, SIA; Oliver Brenner, EnDK; Etienne Courtois, EnDK; Christoph Gmür, AWEL; Daniel Lehmann, Städteverband; Thomas Jud, BFE; Roman Obrist, VSG/Swisspower; Christoph Schär, Suissetec; Thomas Ammann, HEV) ist im Besonderen zu verdanken. Deren Rückmeldung haben entscheidend zur Qualität dieser Arbeit beigetragen.

8 Referenzen

- [1] IPCC, “Global Warming of 1.5°C - Chapter 2: Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development”, 2018.
- [2] BFE, “ENERGIESTRATEGIE 2050 MONITORING-BERICHT 2018, Langfassung”, www.energiemonitoring.ch, pp. 17-19, 2018.
- [3] BAFU, "Emissionen von Treibhausgasen nach revidiertem CO₂,eq-Gesetz und Kyoto-Protokoll, 2. Verpflichtungsperiode (2013–2020)", pp. 14-17, April 2019.
- [4] IEA, “Energy Policies of IEA Countries – Switzerland,” 2012.
- [5] IEA, “Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency,” 2014.
- [6] GEA, Global Energy Assessment - Towards a Sustainable Future, Cambridge University Press and the International Institute for Applied Systems Analysis, Cambridge, 2012.
- [7] A.B. Jaffe, R.N. Stavins, THE ENERGY-EFFICIENCY GAP - WHAT DOES IT MEAN, Energy Policy. 22 (1994) 804–810. doi:10.1016/0301-4215(94)90138-4.
- [8] M. Evans, V. Roshchanka, and P. Graham, “An international survey of building energy codes and their implementation,” *J. Clean. Prod.*, vol. 158, pp. 382–389, 2017.
- [9] O. Lucon et al., “Buildings,” *Clim. Chang.* 2014 Mitig. *Clim. Chang. Contrib. Work. Gr. III to Fifth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Chang.*, vol. 33, pp. 1–66, 2014.
- [10] IEA, “Modernising Building Energy Codes to secure our Global Energy Future: Policy Pathway,” p. 70, 2013.
- [11] S. Yu, J. Eom, M. Evans, and L. Clarke, “A long-term, integrated impact assessment of alternative building energy code scenarios in China,” *Energy Policy*, vol. 67, pp. 626–639, Apr. 2014.
- [12] A. Tulsyan, S. Dhaka, J. Mathur, and J. V. Yadav, “Potential of energy savings through implementation of Energy Conservation Building Code in Jaipur city, India,” *Energy Build.*, vol. 58, pp. 123–130, Mar. 2013.
- [11] M. Rosenberg, D. Jonlin, and S. Nadel, “A Perspective of Energy Codes and Regulations for the Buildings of the Future,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 139, no. 1, p. 010801, 2016.
- [12] D. Cohan, D. Hewitt, and M. Frankel, “The Future of Energy Codes,” *ACEEE Summer Study Energy Effic. Build.*, pp. 79–87, 2010.
- [13] EnDK and EnFK, “Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich 2014,” 2015.
- [14] E E. Vine, A. Williams, and S. Price, “The cost of enforcing building energy codes: an examination of traditional and alternative enforcement processes,” *Energy Effic.*, vol. 10, no. 3, pp. 717–728, 2017.
- [15] J. Goggins, P. Moran, A. Armstrong, and M. Hajdukiewicz, “Lifecycle environmental and economic performance of nearly zero energy buildings (NZEB) in Ireland,” *Energy Build.*, vol. 116, pp. 622–637, 2016.
- [16] P. De Wilde, “The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation,” *Autom. Constr.*, vol. 41, pp. 40–49, 2014.

- [1.1] C. van Dronkelaar, M. Dowson, C. Spataru, D. Mumovic, A Review of the Regulatory Energy Performance Gap and Its Underlying Causes in Non-domestic Buildings, *Front. Mech. Eng.* 1 (2016) 1–14. doi:10.3389/fmech.2015.00017.
- [1.2] „Performance Gap“ in der Schweiz – Brisanz, Ursachen und Einflüsse auf die Differenz von geplantem Energiebedarf und gemessenem Verbrauch in Gebäuden“, Christian Struck, Hochschule Luzern; Michael Benz, 3Plan; Viktor Dorer, EMPA; Beat Frei, ADZ; Monika Hall, FHNW; Martin Menard, Lemon Consult; Sven Moosberger, EQUA Solutions; Kristina Orehounig, ETHZ; Carina Sagerschnig, Gruner Roschi AG
- [1.3] Towards a sustainable Northern European Figures, facts and future (TU Delft, 2008) & siehe auch EU Parlament: Boosting Building Renovation: What potential and value for Europe? [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/587326/IPOL_STU\(2016\)587326_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/587326/IPOL_STU(2016)587326_EN.pdf)
- [1.4] Prognos AG, Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050 - Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000 – 2050, Bern, 2012.
- [1.5] Renovation in Practice: Best practice examples of voluntary and mandatory initiatives across Europe (BPIE, 2015) & <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/6d47bddb-1d14-4597-8878-785ab59fc529/files/fe5c5c7c-ac36-4b0e-9f7d-28d02e83348e>

WP2

- [2.1] Bundesamt für Energie, "Energiestrategie 2050, Monitoring-Bericht 2018 (ausführliche Fassung), pp. 6; 61, November 2018.
- [2.2] V. Carp, "Quantification and Reduction Potentials of the CO2 Emissions of the Swiss Building Stock," ETH Zurich, 2018.
- [2.3] Bundesamt für Statistik, "Gebäude- und Wohnungsregister," 2015. [Online]. Available: <https://www.housing-stat.ch/de/start.html>. [Accessed: 15-Mar-2019].
- [2.4] Bundesamt für Statistik, "Statistik der Unternehmensstruktur," 2015. [Online]. Available: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/aktuell/neue-veroeffentlichungen.assetdetail.3202085.html>. [Accessed: 15-Mar-2019].
- [2.5] Bundesamt für Landestopografie swisstopo, "swissTLM3D Version 1.0 Ausgabe 201," pp. 1–5, 2011.

WP3

- [3.1] Mavromatidis, G., Evins, R., Orehounig, K., Dorer, V., Carmeliet, J. (2014) 'Multi-objective optimization to simultaneously address energy hub sizing, layout and scheduling using a linear formulation' 4th international conference on engineering optimization, September 8th-11th 2014, Lisbon, Portugal.
- [3.2] Wu, R., Mavromatidis, G., Orehounig, K., Carmeliet, J. (2017) 'Multi-objective optimisation of energy systems and building envelope retrofit in a residential community' *Applied Energy* 190, 634–649.
- [3.3] BFS 2018. Politische Gemeinden in der Schweiz, Bundesamt für Statistik [Online]. Available: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/karten.assetdetail.4104233.html> [Accessed: 27-Mar-2019]

WP4

- [4.1] J. Bentham, “An Introduction to the Principles of Morals and Legislation,” 2017.
- [4.2] M. Jakob, G. Catenazzi, M. Melliger, M. Forster, G. Martius, and M. Ménard, “Potenzialabschätzung von Massnahmen im Bereich der Gebäudetechnik,” 2016.
- [4.3] Implenia Schweiz AG und Hochschule Luzern - Technik & Architektur, “Nachhaltigkeit im Bestand,” 2018..
- [4.4] World Business Council for Sustainable Development, “EEG Aktionsplan Zürich,” Zurich, 2018.