

Mai 2025

Möglichkeiten und Grenzen der Evaluation von staatlichen Forschungs- und Innovationsmaßnahmen in Bezug auf ihren Beitrag zur Klimaneutralität

Arbeitspapier

Mai 2025

Möglichkeiten und Grenzen der Evaluation von staatlichen Forschungs- und Innovationsmaßnahmen in Bezug auf ihren Beitrag zur Klimaneutralität

Arbeitspapier

Autoren

Sonja Peterson^{a*}, Marc Blauert^b, Thomas Heimer^b, Finn Ole Semrau^a

^a Kiel Institut für Weltwirtschaft (IfW)

^b Technopolis Group

*Kontakt: sonja.peterson@ifw-kiel.de, Kiellinie 66, 24105 Kiel, Germany.

Förderkennzeichen

Dieser Beitrag wurde gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen [01LA2101A].

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Executive summary (EN)	2
1 Einleitung	3
2 Beiträge von staatlicher F&I Förderung zur Klimaneutralität	4
3 Schritte und Ansätze für eine Wirkungsanalyse	6
3.1 Standard Wirkmodell	6
3.2 Methoden für eine Wirkungsanalyse	7
3.2.1 Einfache bottom-up Berechnung unter Berücksichtigung von Brutto- und Nettoeffekten	7
3.2.2 Quantitative Modellierung	8
3.2.3 Empirische Schätzungen	10
3.2.4 Indikatorbasierte Analysen	11
3.2.5 Qualitative Analysen	11
4 Herausforderungen und Grenzen der Evaluation	14
4.1 Nicht lineare und indirekte Effekte	14
4.1.1 Politikinteraktionen und Systemeffekte	14
4.1.2 Rebound-Effekte	15
4.1.3 Verdrängungs- und Trittbrettfahrer-Effekte	16
4.2 Inhärente Erfassungsprobleme	16
4.2.1 Zeitliche Diskrepanz zwischen Maßnahme und Wirkung	17
4.2.2 Unsicherheit	17
4.2.3 Aufwand, Daten- und Modellverfügbarkeit	17
5 Fazit	18
Literaturverzeichnis	19

Tabellen

Tabelle 1	Beiträge von staatlicher F&I Förderung auf Klimaneutralität	5
Tabelle 2	Übersicht über methodische Ansätze zur Impactanalyse	13
Tabelle 3	Übersicht über methodische Ansätze zur Impactanalyse	18

Abbildungen

Abbildung 1	Ebenen eines Modells für die Abschätzung der Wirkung einer Maßnahme	6
Abbildung 2	Schematische Darstellung Ex-ante und ex-post Analysen	7

Zusammenfassung

Staatliche Forschungs- und Innovations- (F&I) Förderung ist ein wichtiger Baustein, um in Deutschland (und darüber hinaus) Klimaneutralität zu erreichen. Gleichzeitig besteht ein erheblicher Bedarf, entsprechende Maßnahmen bezüglich ihrer Wirkung zu evaluieren, um für eine optimale Ausgestaltung zu sorgen.

Dieser Beitrag zeigt auf, wo die Möglichkeiten aber auch die Grenzen einer Evaluation liegen und geht dabei auf die Besonderheiten von F&I Prozessen ein. Dabei steht nicht nur eine Bewertung der F&I Maßnahmen im Hinblick auf Emissionsminderungen im Fokus, sondern es werden auch weitere Beiträge von F&I Maßnahmen zu Klimaneutralität diskutiert. Außerdem werden Schritte und Ansätze für eine Wirkungsanalyse und verschiedene dabei verwendete Methoden vorgestellt und ihre Möglichkeiten und Herausforderungen diskutiert.

Es zeigt sich, dass eine systematische Analyse der Wirkung von staatlichen F&I Maßnahmen prinzipiell möglich ist, aber gerade die quantitativen Methoden zum einen aufwändig sind, und zum anderen bei F&I Maßnahmen, die durch eine lange zeitliche Diskrepanz zwischen Förderung und Wirkung und eine Vielzahl indirekter Effekte und Unsicherheiten gekennzeichnet sind, sehr schnell an Grenzen stößt. Dementsprechend ist auch das Potenzial zur Quantifizierung von Emissionseinsparungen von F&I Projekten und F&I Maßnahmen begrenzt. Dies gilt besonders für F&I Maßnahmen, die auf immaterielle Aktivitäten abzielen. Die Beiträge von staatlichen F&I Maßnahmen können daneben auch in Kostensenkungen oder Systemeffekten liegen. Für Kostensenkungen sind die verfügbaren Methoden und ihre Grenzen ähnlich wie für Emissionssenkungen. Systemeffekte sind noch schwerer zu evaluieren. Insgesamt ist eine quantitative Bewertung der Auswirkungen von F&I-Finanzierungen auf die Minderung von Treibhausgasemissionen, aber auch allgemeiner auf die Klimaneutralität, angesichts der gegebenen Komplexität häufig nicht möglich. Daher muss im Zweifel auf indikatorbasierte oder rein qualitativ basierte Verfahren zurückgegriffen werden.

Executive summary (EN)

Public funding for research and innovation is an important building block for achieving climate neutrality in Germany and other countries. At the same time, there is a considerable need to evaluate the impact of such measures in order to optimise their design.

This paper shows the possibilities and limitations of an evaluation and addresses the specificities of R&I processes. The focus is not only on the evaluation of R&I measures in terms of emission reductions, but also on other contributions of R&I measures to the overarching objective of climate neutrality. In addition, the paper presents the steps and approaches for an impact analysis and different methods used for this purpose are and discusses their opportunities and challenges.

This shows that a systematic analysis of the impacts of governmental R&I measures is possible in principle, but that the quantitative methods in particular are complex on the one hand, and on the other hand very quickly reach their limits in the case of R&I measures that are characterised by a long time lag between funding and impact and a large number of indirect effects and uncertainties. Accordingly, the potential for quantifying emission savings from R&I projects and R&I measures is also limited. This applies in particular to R&I measures targeting intangible activities. The contributions of government R&I measures may also be in the form of cost reductions or system effects. The methods available for cost reductions and their limitations are similar to those for emission reductions. System effects are even more difficult to evaluate. Given this complexity, an overall assessment of the impact of R&I funding on greenhouse gas emission reductions, and more generally on climate neutrality, is often not possible in quantitative terms. Therefore, in cases of doubt, indicator-based or purely qualitative methods may have to be used.

1 Einleitung

Der Klimawandel ist eine der größten globalen Herausforderungen und erfordert in vielerlei Hinsicht staatliche Maßnahmen, um die Stabilisierung und perspektivisch auch den Rückbau der Treibhausgaskonzentrationen auf einem Niveau zu erreichen, bei dem eine gefährliche vom Menschen verursachte Störung des Klimasystems verhindert wird (Artikel 2 Klimarahmenkonvention). So hat sich die EU in ihrem Green Deal das Ziel gesetzt bis 2050 klimaneutral zu werden und das deutsche Klimaschutzgesetz sieht vor, in Deutschland schon bis 2045 Treibhausgasneutralität zu erreichen. Klar ist, dass diese Ziele nur durch einen Mix an Politikinstrumenten und Beiträge aller Sektoren erreicht werden können.

Unbestritten ist ebenfalls, dass Forschungs- und Innovations- (kurz: F&I) Aktivitäten zentral für die Erreichung der Klimaziele sind. So unterstreicht etwa die Internationale Energieagentur (IEA 2021) die Schlüsselrolle von Technologien wie Batterien, Elektrolyseuren zur Erzeugung von grünem Wasserstoff und die direkte Extraktion von CO₂ aus der Atmosphäre, die sich alle noch in der Entwicklungsphase befinden, aber zwischen 2020 und 2050 mehr als 40% zur Reduzierung der CO₂-Emissionen beitragen sollen.

Einigkeit besteht auch darin, dass zwar private Investitionen in F&I Maßnahmen und neue Technologien einen zentralen Beitrag leisten müssen, dass aber auch der staatlichen F&I Förderung eine wichtige Rolle zukommt. Staatliche F&I Förderung ist notwendig, weil der Innovationsbereich von zahlreichen Marktunvollkommenheiten, Externalitäten, Netzwerkeffekten, Pfadabhängigkeiten, unvollständigen Kapitalmärkten) und Unsicherheiten gekennzeichnet ist, die dazu führen, dass private F&I Maßnahmen aus gesamtgesellschaftlicher Sicht nicht in ausreichendem Maße stattfinden. Hinzu kommt die hohe gesellschaftliche Akzeptanz für F&I Maßnahmen (im Gegensatz etwa zu CO₂-Bepreisung) und zunehmend auch industriepolitische Gründe im internationalen Wettbewerb um in der Zukunft relevante Märkte¹.

Das Bewusstsein für die Notwendigkeit, Marktunvollkommenheiten für neue Technologien zu adressieren, sowie die bestehende Akzeptanz von F&I Maßnahmen bilden eine grundlegende Voraussetzung für deren Umsetzung. Staatliche F&I Maßnahmen zur Erreichung klimapolitischer Ziele sind jedoch auch mit fiskalischen Kosten verbunden, die – insbesondere in Zeiten knapper Mittel – an ihrer Effektivität gemessen werden müssen. Deswegen besteht generell ein zunehmender Bedarf am Monitoring und der Evaluation von klimapolitischen Maßnahmen, zu denen auch staatliche F&I Förderung zählt. Dies spiegelt sich in verschiedenen EU-Richtlinien und Verordnungen aber auch im deutschen Klimaschutzgesetz wider (vgl. z.B. Schlomann et al. 2022). Vor diesem Hintergrund ist eine ganze Reihe an Evaluationsleitfäden mit unterschiedlichen Foki in Bezug auf Art der zu evaluierenden Maßnahmen, Bewertungskriterien und Bewertungsansätze entstanden. So stellen beispielsweise Schlomann et al. (2022) ganz allgemein eine Methodik zur ex-ante Abschätzung von Energie- und Treibhausgasminderungen von energie- und klimapolitischen Maßnahmen dar und auch die Wissenschaftsplattform Klimaschutz gibt eine Orientierungshilfe „Good Practice“ für Ex-Ante-Evaluierungen von Klimaschutzmaßnahmen (Matthes et al. 2021). Die EU stellt eine Toolbox für die Impact-Analyse und Evaluation von Politikmaßnahmen bereit (European Commission 2023) und ein EU-Report zeigt die Möglichkeiten für eine ex-post Evaluation von klimapolitischen Maßnahmen in den sogenannten Effort-Sharing Sektoren der EU (Renders et al. 2020). Dabei stehen mit Blick auf die konkreten Klimaziele meist die Emissionsminderungen im Vordergrund, leider oft ohne diese auch in einen gesamtwirtschaftlichen und sozialen Kontext zu stellen. Spezieller fokussiert auf F&I Maßnahmen, deren Bewertung mit besonderen Problemen behaftet ist, zeigen Miedzinski et al. (2013) und Peterson et al. (2024) welche Schritte für eine Evaluation notwendig sind.

Dieses Papier fokussiert ebenfalls auf staatliche F&I Förderung, nimmt aber eine andere Perspektive ein. Statt ein konkretes Evaluationsverfahren zu entwickeln und zu beschreiben,

¹ Siehe etwa Meissner, Peterson und Semrau (2024) und Peterson et al. (2024), die diese Gründe ausführlich darstellen. Siehe auch die Ausführungen dazu des Expertenrat für Klimafragen (2025).

zeigt dieses Papier generell auf, wo die Möglichkeiten aber auch die Grenzen einer Evaluation liegen und geht dabei auf die Besonderheiten von F&I Prozessen ein. Dabei soll es nicht nur um eine Bewertung der F&I Maßnahmen im Hinblick auf Emissionsminderungen gehen, sondern auch um weitere Beiträge von F&I Maßnahmen zu Klimaneutralität, die eine ebenso große Rolle spielen. Im Folgenden werden daher zunächst diese möglichen Beiträge dargestellt. Anschließend geht es in Kapitel 3 allgemein um Schritte und Ansätze für eine Wirkungsanalyse und um verschiedene Methoden sowie ihre Möglichkeiten und Herausforderungen. In Kapitel 4 werden zwei Arten von generellen Herausforderungen der Wirkungsanalyse von staatlichen F&I Maßnahmen und deren Unterkategorien diskutiert. Kapitel 5 führt die bisherigen Punkte in einer Diskussion zusammen und zieht ein Fazit.

2 Beiträge von staatlicher F&I Förderung zur Klimaneutralität

Staatliche F&I Maßnahmen zielen darauf ab, neues Wissen, neue Kompetenzen, neue Konzepte, oder neue oder veränderte Produkte, Technologien und Infrastrukturen zu entwickeln, die auf Lernsysteme, Governance, soziale Praktiken, Konsumverhalten, Produktionssysteme, Businessmodelle und Infrastruktur wirken² und damit mittelbar einen Einfluss auf Klimaneutralität als Zielgröße haben. Der naturgemäß oft im Fokus stehende Beitrag von F&I Förderung (wie auch anderer klimapolitischer Maßnahmen) auf Klimaneutralität zielt auf die Verringerung von Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen), sei es durch die Verringerung der direkten Emissionen oder der indirekten Emissionen unter Berücksichtigung des gesamten THG-Fußabdrucks im bestehenden Technologiepfad. Emissionen können auf verschiedenen Ebenen beeinflusst werden:

- Auf Ebene von **Produkten oder Dienstleistungen** - beispielsweise die Emissionen pro hergestellte Tonne Stahl oder pro gefahrenen Kilometer.
- **Verbraucher*innen, Haushalten oder einzelnen Institutionen** – so werden beispielsweise die Emissionen des Stahlproduzenten von der Stahlnachfrage und die Verkehrsemissionen von der Anzahl der gefahrenen Kilometer beeinflusst.
- Auf der Ebene ganzer **Branchen oder Sektoren**, ebenfalls beeinflusst beispielsweise durch die Gesamtnachfrage nach Produkten, von Verdrängungseffekten oder im Mobilitätsbeispiel von Entwicklungen wie Homeoffice oder Urlaubsgewohnheiten.
- Auf der Ebene eines **Landes**. Dies hängt auch vom gesamten Politikmix ab und beispielsweise davon, ob die Emissionen durch ein Gesetz oder Emissionshandelssystem gedeckelt sind oder nicht.
- Auf der **globalen Ebene**, die für die Minderung des Klimawandels letztlich entscheidend ist, und für die weitere Faktoren eine Rolle spielen. Hierzu zählt etwa die Verlagerung von Emissionen ins Ausland und der internationale Technologietransfer.

F&I Maßnahmen zielen dabei von vornherein auf Unterschiede dieser Ebenen ab. Dabei sind Effekte oberhalb der Produkt- oder Dienstleistungsebene generell schwer abzuschätzen und es liegt oft außerhalb des Einflussfeldes der Maßnahmen ob daraus am Ende ein Beitrag zu Emissionsreduktionen auf nationaler oder globaler Ebene resultiert. Dies wird in Kapitel 4.1 erneut aufgegriffen.

Auch wenn das entscheidende Kriterium für Klimaneutralität die Höhe der Emissionen sind, können andere Beiträge von F&I Förderung ebenso wichtig sein und Zielgrößen darstellen. Insbesondere können Kostensenkungen für emissionsarme oder freie Technologien nicht nur ein indirekter Beitrag sein (weil diese Technologien dadurch mehr genutzt werden und somit Emissionen einsparen), sondern in einem Gesamtsystem, in dem die Emissionen absolut gedeckelt sind – insbesondere durch einen Emissionshandel oder aber auch durch Verbote

² Vgl. Peterson et al. (2024) zu verschiedenen Output- und Impactkategorien.

(etwa von fossilen Heizungen die emissionsfreie Heizsysteme erzwingen), ist die Kostensenkung bzw. die aktive Unterstützung der Entwicklung hin zur Marktreife von Lösungen der eigentlich zentrale Beitrag der F&I Förderung.

Die Kosten beeinflussen auch andere wichtige Ziele wie die Belastung der Haushalte und damit verbunden die Akzeptanz der Maßnahmen. Auf der Ebene der Industrie beeinflussen die Kosten die Wettbewerbsfähigkeit von kohlenstoffarmen Produkten bzw. Produktionsweisen und damit auch die Gefahr der Verlagerung von THG-Emissionen in Länder mit weniger scharfer Klimapolitik. Ein solche Verlagerung führt am Ende zu geringeren Emissionseinsparungen oder gar Emissionserhöhungen auf globaler Ebene, wenn dort mehr THG-Emissionen pro produzierte Einheit ausgestoßen werden. Außerdem ergibt sich auch eine Gefahr für die heimische Wertschöpfung, wenn die Wertschöpfungsanteile bei erneuerbaren Energien wegen der fehlenden Innovationskraft der substitutiven Technologien niedriger sind als bei fossilen.

Weitere Beiträge sind weniger leicht zu definieren, beziehen sich aber im weiteren Sinne auf Netzwerk- und Systemeffekte. Zum Beispiel können die Auswirkungen von grünem Wasserstoff und Batterien nur auf Systemebene bewertet werden, ebenso wie die Auswirkungen neuer Mobilitätskonzepte. An dieser Stelle ist eine detaillierte Folgenabschätzung hinsichtlich der Emissions- und Kostenauswirkungen schwierig, die Ergebnisse der F&I Maßnahmen stellen aber sicherlich einen Beitrag zur Klimaneutralität dar.

Insgesamt sollte zudem berücksichtigt werden, auf welcher Ebene die Wirkungen auftreten. Die meisten Auswirkungen finden auf der Mikro- und Mesoebene statt, d. h. auf der Produkt- und Dienstleistungsebene, auf der Verbraucher-, Haushalts- und Organisationsebene. Relevant für den Klimawandel oder die Gesamtbewertung der Maßnahme sind aber die Auswirkungen auf der regionalen, nationalen bzw. bei Emissionen die globale Ebene. Berücksichtigt werden muss also, wie sich Veränderungen, die auf einer technologischen, verfahrenstechnischen oder sozialen Ebene stattfinden in Auswirkungen auf einer höheren Ebene verwandeln, sobald ihre Auswirkungen auf die verschiedenen Sektoren berücksichtigt werden.

Tabelle 1, die Peterson et al. (2024) entnommen ist, fasst die wichtigsten Beiträge von F&I zur Klimaneutralität zusammen.

Tabelle 1 Beiträge von staatlicher F&I Förderung auf Klimaneutralität

Ebene Effekte	Mikroebene		Mesoebene	Makroebene	
	Produkte/ Dienst- leistungen	Haushalte/ Institutionen	Industrien/ Sektoren	Länder / Regionen	Supra-national/ Global
Direkte Emissionen / Fußabdruck	Direkte Emissionen / Fußabdruck je Output-Einheit	Direkte Emissionen / Fußabdrücke je Haushalt / Institution	Direkte Emissionen / Fußabdruck je Industrie / Sektor bzw. sektor-übergreifend in der Sektorkopplung	Nationale, territoriale Emissionen / Fußabdrücke	Globale Emissionen
Kosten-reduktion	Produktionskosten je Output-Einheit	Kosten pro Haushalt, Unternehmen etc.	Wettbewerbsfähigkeit der Wertschöpfungskette der Industrie	Reduzierte Kosten, um Emissionsziele zu erreichen Weniger Emissionsverlagerung	Reduzierte Kosten, um Emissionsziele zu erreichen
Netzwerk- / System-effekte	Beiträge zur Klimaneutralität, die nur indirekt Emissionen oder (System-)Kosten reduzieren, einschließlich materieller und immaterieller Beiträge.				

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Peterson et al. (2024).

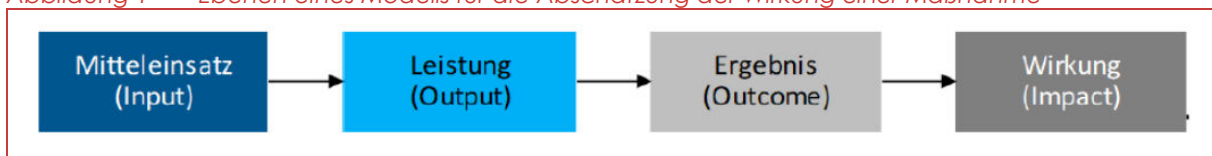
3 Schritte und Ansätze für eine Wirkungsanalyse

Um die Möglichkeiten und Grenzen einer Evaluation von staatlichen F&I Maßnahmen aufzuzeigen, ist es im ersten Schritt hilfreich, sich etablierte Vorgehensweisen für eine solche Evaluation und deren einzelne Schritte und damit verknüpfte Methoden vor Augen zu führen. Darauf aufbauend ist es möglich zu diskutieren, wo die jeweiligen Herausforderungen liegen – generell und für den speziellen Fall staatlicher F&I Unterstützung.

3.1 Standard Wirkmodell

Zahlreiche Bewertungsleitfäden und Methodiken (European Commission et al. 2020; Griniece et al. 2020; Miedzinski et al. 2013; Peterson et al. 2024; Schlomann et al. 2020; 2022) greifen im Kern auf ein lineares Wirkungsmodell zurück, wie es in seiner einfachsten Form von Schlomann et al. (2020) dargestellt wird (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1 Ebenen eines Modells für die Abschätzung der Wirkung einer Maßnahme



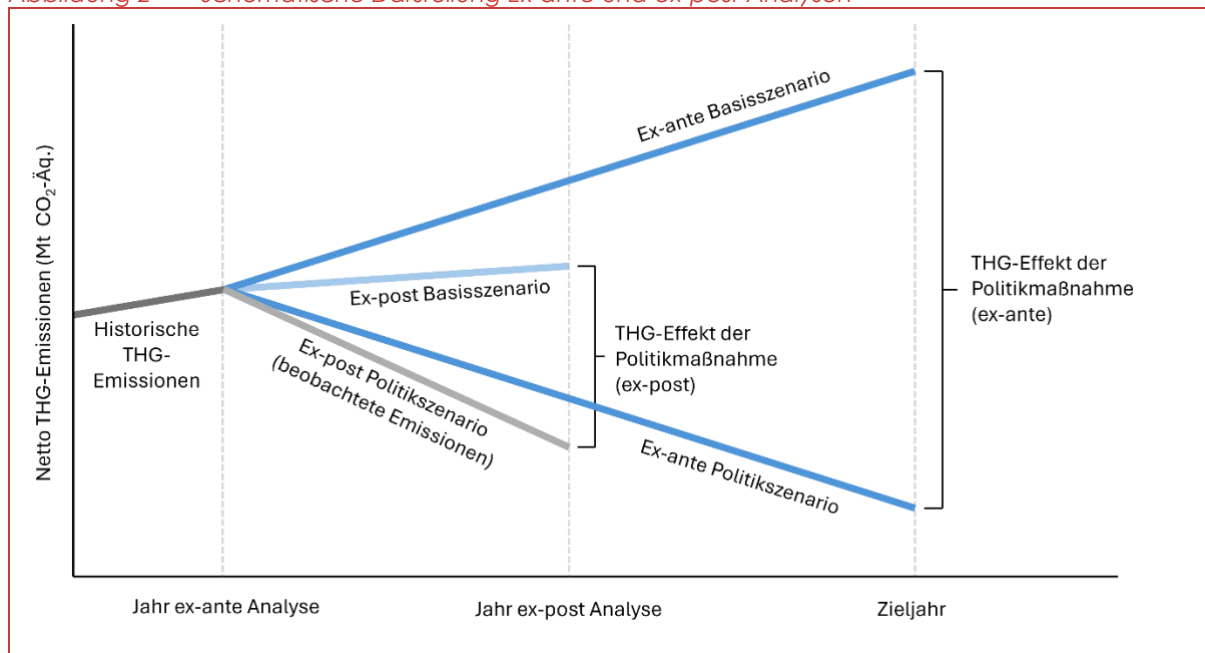
Quelle: Schlomann et al. (2020).

Das Modell stellt die Wirkung einer Maßnahme als kausal begründete Abfolge von Mitteleinsatz (Inputs), direkten Leistungen (Outputs), zu Ergebnissen (Outcomes) und schließlich der Wirkung (Impact) auf die Zielgrößen dar. In ausführlicheren Darstellungen sind die zahlreichen von außen wirkenden Einflussfaktoren auf diese Wirkebenen, wie etwa für F&I Maßnahmen das allgemeine F&I System oder weitere Politikmaßnahmen (Miedzinski et al. 2013; Peterson et al. 2024) und Evaluationskriterien wie Relevanz, Effektivität, Effizienz und Kohärenz explizit mit aufgenommen (European Commission et al. 2020).

Dabei wird hervorgehoben, dass eine Bewertung von Schritt zu Schritt komplexer und unsicherer wird. Während Mitteleinsatz und auch Leistungen ex-post direkt bestimmt werden können und ex-ante zumindest weitgehend planbar sind, wird dies bei Ergebnissen und Wirkungen zunehmend schwieriger, weil diese von immer mehr (externen) Einflussfaktoren beeinflusst werden, die Zeitintervalle sehr lang werden können und die Zusammenhänge immer komplexer werden. Es ist also notwendig aufwändigere Methodiken einzusetzen.

Das Wirkmodell kann prinzipiell sowohl für eine ex-ante als auch eine ex-post Analyse als Basis dienen. Beide müssen oder können aber teilweise auf unterschiedliche Methoden und Ansätze zurückgreifen, um zu Bewertungen zu gelangen. Abbildung 2, veranschaulicht die Beziehung zwischen einer ex-ante und ex-post-Bewertung. In beiden Fällen geht es um die Differenz zwischen einem Basisszenario ohne die entsprechende Maßnahme und einem Politikscenario mit Maßnahme. Bei einer ex-post Analyse liegen allerdings Erkenntnisse vor (beispielsweise tatsächliche Emissionen), die bei einer ex-ante Analyse noch nicht vorhanden waren, so dass die Schätzungen abweichen. In beiden Fällen ist die Definition des Basisszenarios zentral und basiert auf vielen Annahmen (siehe z.B. Rich et al. 2014; Matthes et al. 2021), denn weder ex-post noch ex-ante ist klar, was ohne eine Politikmaßnahme passieren wird (ex-ante) oder passiert wäre (ex-post). Das zur Verfügung stehende Methodenset wird im folgenden Unterkapitel dargestellt.

Abbildung 2 Schematische Darstellung Ex-ante und ex-post Analysen



Quelle: Angepasste Grafik basierend auf Rich et al. (2014).

3.2 Methoden für eine Wirkungsanalyse

Um Möglichkeiten, Aufwand und Herausforderungen einer Wirkungsanalyse aufzuzeigen, ist es sinnvoll, sich mit den wichtigsten Methoden zu beschäftigen, die auch in Bezug auf staatliche F&I Unterstützung zum Einsatz kommen können. Dabei ist es hilfreich, die Methoden danach zu kategorisieren, für welche Art von Maßnahmen und Beiträge zur Klimaneutralität sie angewendet werden können, ob sie sich für ex-ante oder ex-post Analysen eignen und ihren Aufwand abzuschätzen. Wichtig ist auch, auf Zielkonflikte zwischen Klimaneutralität und anderen Zielstellungen wie wirtschaftliche Entwicklung und soziale Aspekte, sowie auf mögliche negative Wechselwirkungen mit anderen Umweltzielen (z.B. nachhaltige Nutzung von Wasserressourcen oder Schutz der Biodiversität) einzugehen.

Wir beginnen zunächst mit einer Reihe von rein-quantitativen Ansätzen und wenden uns dann auch angesichts der identifizierten Herausforderungen auch (teilweise) qualitativen Ansätzen zu.³

3.2.1 Einfache bottom-up Berechnung unter Berücksichtigung von Brutto- und Nettoeffekten

Bei Politikmaßnahmen, die direkt auf Emissionsreduktionen durch die (Weiter-)Entwicklung emissionsarmer Technologien oder auf einen Technologiewechsel hin zu emissionsfreien Technologien abzielen, ist zumindest auf der Mikroebene sowohl ex-ante als auch ex-post eine direkte Berechnung von Emissionseinsparungen möglich, aus der für die Meso- oder Makroebene durch Effektbereinigung Nettoeffekte abgeleitet werden können. Wie solche Berechnungen auf Projektebene erfolgen können, wird beispielsweise in einem Leitfadens für Anträge zum europäischen Innovationsfond ausführlich beschrieben (European Commission 2024a). Im Kern wird die absolute Treibhausgasvermeidung als Differenz zwischen allen Emissionen, die in einem Referenzszenario ohne das vorgeschlagene Projekt entstehen würden, und allen Emissionen aus der Projektaktivität über einen bestimmten Zeitraum, berechnet.

Ein anschauliches Beispiel ist etwa die staatliche Förderung des Umstiegs eines Stahlwerks von herkömmlichem Stahl, auf „grünen“ Stahl. Hier kann (ex-ante) abgeschätzt oder (ex-post)

³ Wir beschränken uns dabei auf Methoden, die sich für die Wirkungsmessung eignen. Weitere Methoden einer Evaluierung wie etwa Kosteneffektivitätsanalysen, Kosten-Nutzen Analysen oder Dekompositionsanalysen, wie sie etwa in Renders et al. (2020) erwähnt werden, werden im Folgenden nicht behandelt.

bestimmt werden, wieviel Emissionen bei der Produktion einer Tonne Stahl auftreten und der Bruttoeffekt ergibt sich, wenn dieser Wert (ex-ante) mit der bisher produzierten Menge an Stahl multipliziert wird oder (ex-post) mit der tatsächlich produzierten Menge. So ist beispielsweise in etwa die Vorgehensweise, um für beim EU-Innovationsfond beantragten Projekten die resultierenden Emissionsreduktionen abzuschätzen (European Commission 2024a). Nettoeffekte können abgeschätzt werden, in dem etwa (ex-ante) Schätzungen der zukünftigen Stahlnachfrage und eine mögliche Verlagerung der Stahlproduktion in andere Länder abgeschätzt werden. Ex-post können Verdrängungseffekte anhand von Daten abgeschätzt werden. Für die Effektbereinigung sind allerdings unter Umständen komplexere Methoden wie eine integrierte Modellierung notwendig (siehe Abschnitt 3.2.2).

Ein weiteres Beispiel ist die Förderung von Investitionen für den Austausch einer technischen Komponente durch eine energieeffizientere Technologie (vgl. Schlomann et al. 2020). Hier kann ex-ante abgeschätzt bzw. ex-post bestimmt werden wie viele installierte Anlagen gefördert wurden und wie hoch die realisierten Einsparungen waren. Für die Effektbereinigung gilt das gleiche wie für das Stahl-Beispiel.

Die skizzierte Herangehensweise ist prinzipiell für F&I Maßnahmen möglich, die auf Energie- oder Emissionseinsparungen abzielen und sich auf Technologien mit hohem Technologie-Reifegrad (TRL – Technology Readiness Level) beziehen. Es wird allerdings bereits klar, dass verglichen zu den Beispielen oben, weitere Unsicherheiten und Komplexitäten hinzukommen. Während in den Beispielen der Einsatz bestimmter, bekannter Technologien gefördert wurde und ex-ante abschätzbar bzw. ex-post messbar ist, wo diese Technologien zum Einsatz kommen, zielen F&I Maßnahmen in der Regel auf niedrige TRL und sollen dazu beitragen, eine Entwicklung dieser Technologien anzustoßen. Dabei ist ex-ante unsicher, ob am Ende der Maßnahme überhaupt eine zur Minderung des Klimawandels relevante Technologie entwickelt wird und wenn ja, wieviel Energie oder Emissionen sie einsparen kann. Ebenso ist unklar, ob diese Technologie dann in der Praxis eingesetzt wird und in welchem Umfang. Selbst die Existenz einer Technologie führt noch zu keinerlei Einsparungen, wenn sie sich nicht am Markt etabliert. Nach Ende der Fördermaßnahme steht zwar fest, was entwickelt oder weiterentwickelt wurde, aber auch dann bleiben viele Unklarheiten. Inwieweit die Technologie genutzt wird, steht oft erst nach vielen Jahren fest und hängt von vielen Faktoren wie anderen Politikinstrumenten, Präferenzänderungen, Entwicklung komplementärer Technologien etc. ab. Den Einfluss einer bestimmten F&I Maßnahme zu isolieren ist entsprechend schwer umzusetzen.

Von F&I Förderung abseits der Technologieförderung, wie etwa die Förderung von neuen Konzepten, Geschäftsmodellen oder anderen intangiblen Outputs und Outcomes sind direkte Emissionsberechnungen prinzipiell nicht möglich. Die Maßnahmen wirken über die Veränderung der Rahmenbedingungen indirekt, z.B. über den Aufbau von Clustern zur Entwicklung emissionsarmer Technologien oder über auf emissionssenkende fokussierende Finanzinstrumente, auf die Emissionen ein. Eine kausale Wirkkette ist somit nicht gegeben.

Ist der Beitrag eher in Form von Kostenreduktionen zu erwarten, treten vergleichbare Probleme auf. Abschätzungen von potenziellen Emissionsreduktionen oder anderen Beiträgen zur Klimaneutralität durch direkte bottom-up Berechnung sind also im Bereich von F&I Förderung enge Grenzen gesetzt. Bestenfalls kann mit der bottom-up-Methode ex-ante für sehr klar definierte technologische Entwicklungen eine grobe Abschätzung der Einsparpotenziale gemacht werden, in dem abgeschätzt wird, wieviel Emissionseinsparung eine Technologie im Vergleich zu einer herkömmlichen Technologie hat, welchen Beitrag dazu diese spezifische F&I Maßnahme leistet und wie stark die neue Technologie zum Einsatz kommt. Ex-post sind die Unsicherheiten über die Technologienutzung kleiner, aber der Beitrag der staatlichen Förderung bleibt unklar.

3.2.2 Quantitative Modellierung

Vor allem in der ex-ante Evaluation von klimapolitischen Maßnahmen in Bezug auf ihre Treibhausgas- sowie Kosten- und Wohlstandsimplikationen und ihre Rückkoppelung in der gesamten Volkswirtschaft kommen in Abhängigkeit von der Art der Maßnahmen

unterschiedliche Typen von quantitativen Modellen zum Einsatz. Wie Nikas, Doukas und Papandreou (2019) betonen, können diese auf unterschiedliche Weise klassifiziert werden. In ihrer eigenen Klassifikation gibt es fünf gängige Klassen von Modellen:

Die erste Klasse, **Wachstumsmodelle**, sind i.d.R. hochaggregierte und stilisierte Modelle, die den Verlauf einer Wirtschaft und ihre Wechselwirkung mit dem Klima in vollständig integrierter Weise erfassen. Sie werden typischerweise für die Analyse sehr stilisierter Politikmaßnahmen oder Szenarien eingesetzt. Für eine Analyse eher kleinteiliger Politikmaßnahmen sind sie nicht geeignet.

Die zweite Modellklasse sind Berechenbare Allgemeine Gleichgewichtsmodelle (Englisch: **Computable General Equilibrium (CGE)-Modelle**). CGE-Modelle bilden einzelne Sektoren durch Produktionsfunktionen ab und enthalten oft auch eine gewisse Auflösung relevanter Technologien, auch wenn sie immer noch sehr aggregiert sind. Der große Vorteil von CGE-Modellen ist, gesamtwirtschaftliche und oft auch internationale Rückkopplungseffekte zu berücksichtigen. Dies ist vor allem mit Blick auf den Energiesektor wichtig. So erhöht beispielsweise eine CO₂ Bepreisung die Energiepreise und führt zu weniger Energienachfrage. Sie verteuert auch energieintensive Zwischenprodukte und führt zu strukturellen Anpassungen in quasi sämtlichen Produktionssektoren und im Konsumbereich. Einzelne Technologien werden in CGE-Modellen nur begrenzt abgebildet und auch technischer Fortschritt wird meist nur sehr schematisch modelliert. Zwar ist es möglich, in CGE-Modellen auch sehr detaillierte klimapolitische Maßnahmen explizit abzubilden, aber es hängt vom Aggregationsniveau des einzelnen Modells ab, ob dies praktisch möglich ist. Generell sind CGE-Modelle damit wenig geeignet, um Technologiewechsel explizit zu modellieren und zu analysieren. Globale, mehr-Ländermodelle beschränken sich aufgrund der Datenverfügbarkeit und sonst resultierender Komplexität auf eine grobe Abbildung der Anreize durch Energiesteuern und CO₂-Preise, während sich etwa die Einzelheiten des deutschen EEG, Förderprogramme oder auch Effizienzrichtlinien auf dem vorhandenen Aggregationsniveau nicht abbilden lassen. CGE-Modelle können detaillierter werden, aber sind im Kern nicht darauf ausgelegt, kleinteilige Klimapolitiken wie Förderprogramme zu analysieren. Sie werden ggf. im Zusammenspiel mit anderen, disaggregierten Modellen verwendet, um gesamtwirtschaftliche Wechselwirkungen zu erfassen. Dies ist beispielsweise in der EU der Fall, die auf das CGE-Modell GEM-E3 als Teil eines Modellverbundes zurückgreift (European Commission 2024b).

Eine weitere Modellklasse auf gesamtwirtschaftlicher Ebene sind **Makroökonomische Modelle** (siehe Nikas et al. 2019), die Zusammenhänge aus historischen Daten schätzen. Dies hat gegenüber CGE Modellen Vor- und Nachteile. Was die Art der Politiken angeht, die beide Modelltypen analysieren können, sind die Modelle sich aber recht ähnlich.

Zusammengenommen fallen Wachstums-, CGE- und Makroökonomische Modelle und ebenso „sonstige integrierte Bewertungsmodelle“ unter das, was anderswo unter „Integrierte Bewertungsmodelle (Integrated Assessment Models IAMs) und Energie-Umwelt-Wirtschaft-Modelle (E3) zusammengefasst wird. Diese sind laut United Nations Climate Change (2024) für die „Bewertung der Auswirkungen der Umsetzung von Maßnahmen zur Bewältigung des Klimawandels am relevantesten, da sie einen starken Schwerpunkt auf sozioökonomische Aspekte legen. Diese Modelle verfügen über detaillierte sektorale und regionale Klassifizierungen, die bei der Bewertung der Auswirkungen von wirtschaftlicher Diversifizierung, Handel und Spillover-Effekten nützlich sein können. Sie sind jedoch insgesamt weniger gut geeignet, um technologische Entwicklung und Technologiewechsel zu berücksichtigen.“

Die für Projektionsberichte und detaillierte Maßnahmenanalysen typischerweise verwendeten quantitativen Modelle sind unterschiedliche Arten von **Sektormodellen** (bzw. partiellen Gleichgewichtsmodellen), die eine detaillierte Analyse der Auswirkungen klimapolitischer Maßnahmen in einem bestimmten, relevanten Wirtschaftssektor ermöglichen. Ursprünglich waren dies vor allem **Energiesystem- und Strommarktmodelle**, die die Energietechnologien im Energie- bzw. Stromsektor und die damit verbundenen Kosten, detailliert darstellen und u. a. dazu dienen, die kostengünstigsten Möglichkeiten zur Verringerung der Treibhausgasemissionen oder die Kosten alternativer klimapolitischer Maßnahmen zu ermitteln. United

Nations Climate Change (2024) hebt hervor, dass Energiemodelle besonders wichtig sind, wenn es um Energieeffizienz und die Analyse der Auswirkungen neuer Technologien geht. Dagegen sei die Abdeckung sozioökonomischer Fragen im Allgemeinen weniger gut. In der Praxis kommen diese Modelle regelmäßig zum Einsatz. So verwendet beispielsweise die EU das Energiesystemmodell POLES (auf globaler Ebene) und PRIMES (auf EU-Ebene) für ihre Wirkungsanalysen (European Commission 2024b). Für den Projektionsbericht des Umweltbundesamtes (UBA) für Deutschland kommt u.a. das Strommarktmodell PowerFlex des Ökoinstituts zum Einsatz (Ökoinstitut 2023). Mit Klimapolitikmaßnahmen, die zunehmend alle Sektoren betreffen kommen in entsprechenden Modellverbunden weitere Sektormodelle zum Einsatz, so auf EU-Ebene das Modell PRIMES-TEMOVE für den Transportsektor, die Modelle GLOBIOM und CARPRI für den Landwirtschafts- und Forstsektor und das GAINS Modell für nicht CO₂-Treibhausgase, die oft nicht in anderen Modellen erfasst sind. Für den oben genannten deutschen Projektionsbericht kommen Sektormodelle für den Industriesektor, den Gebäudesektor, den Transportsektor, die Landwirtschaft und den Abfallsektor zum Einsatz, die dann zusammengeführt werden.

Modelle oder Modellverbünde sind häufig das zentrale Instrument für ex-ante Abschätzungen der Wirkung von klimapolitischen Maßnahmen und werden auch für die Effektbereinigung bei bottom-up Berechnungen vorgeschlagen (Schloman et al. 2020). Dazu wird typischerweise ein Referenzszenario ohne die entsprechenden Maßnahmen definiert. Anschließend werden Projektionsberechnungen mit Maßnahmen⁴ erstellt und die Ergebnisse mit dem Referenzszenario verglichen. Letzteres hat dabei einen starken Einfluss auf die Ergebnisse und ist generell abhängig von vielen Annahmen. Für ex-post Analysen kann prinzipiell eine ähnliche Herangehensweise gewählt werden, allerdings wird dies in der Praxis seltener angewendet.

Allen Modellen ist gemeinsam, dass ihre Erstellung, Pflege und Anwendung mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist und besonderer Expertise bedarf (vgl. z.B. Expertenrat für Klimafragen (2024)). Meist arbeiten ganze Modellierungsteams von Expert*innen bzw. Wissenschaftler*innen an und mit diesen Modellen und Modellverbünden. Die Analyse von bestimmten Politikmaßnahmen bedarf stets der Implementierung neuer Szenarien, was ebenfalls aufwändig ist. Hinzukommt, dass sie die Wirkungen einzelner Maßnahmen oft nur im Zusammenspiel mit anderen Maßnahmen sinnvoll analysieren lassen. Ob eine isolierte Wirkung überhaupt analysiert werden kann, wird kritisch gesehen.

All dies bezieht sich allgemein auf die Analyse von klimapolitischen Maßnahmen und nicht spezifisch von F&I Maßnahmen. Viele Modelle wurden primär eingesetzt, um Preisinstrumente wie Subventionen, Steuern und CO₂-Handel zu analysieren oder in Sektormodellen auch ordnungspolitische Maßnahmen. Die Analyse von F&I Fördermaßnahmen ist in allen beschriebenen Modelltypen schwierig. Optimalerweise müssten dazu Modelle die volle Wirkkette von F&I Maßnahmen abbilden, wozu bekannt sein müsste, welche direkten und indirekten Auswirkungen diese in Bezug auf Kosten und Emissionen haben, wie und wie schnell sich neue Technologien durchsetzen. Dies ist nicht so einfach möglich und auch wenn es verschiedene Ansätze gibt, technologischen Fortschritt in die Modelle einzubauen (Köhler et al. 2006), ist dies stark vereinfacht und wird auch den im Innovationssystem inhärenten Unsicherheiten nur im Ansatz gerecht. Analysen sind daher nur unter starken Annahmen möglich.

3.2.3 Empirische Schätzungen

Empirische Schätzungen bzw. Regressionsanalysen zielen darauf ab, die Beziehung zwischen zwei oder mehr Variablen zu untersuchen. Dieser Ansatz eignet sich primär für ex-post Analysen und (siehe European Commission et al. (2020)) ist eine nützliche Methode zur Abschätzung der Auswirkungen einer Politik, wenn die Auswirkungen der Politik durch eindeutige Variablen charakterisiert werden können und gute Daten über die Trends für diese Variable sowie für andere Einflussfaktoren verfügbar sind. Ob dieser Ansatz verwendet werden kann, hängt also

⁴ Hierbei wird bei den Berechnungen zwischen Modellen mit bereits operativ arbeitenden Maßnahmen (MMS) und verabschiedeten aber noch nicht operativ arbeitenden Maßnahmen (MWMS) unterschieden.

stark von verfügbaren Daten ab und der Ansatz ist zudem eher für Programme als Einzelmaßnahmen geeignet. Zahlreiche empirische Studien zeigen etwa auf Firmen-, Länder- oder länder-übergreifender Ebene allgemein den Einfluss von F&I Ausgaben auf Innovationen oder Emissionen (siehe Meissner, Peterson und Semrau 2024 für einen Überblick relevanter Studien). Da detailliertere Daten fehlen, handelt es sich allerdings meist um den Einfluss privater F&I Ausgaben oder es wird nicht zwischen privaten und staatlichen Ausgaben unterschieden. Außerdem sind private und staatliche Ausgaben im gewissen Rahmen Substitute und es ist schwer zu bestimmen inwieweit staatliche Ausgaben für F&I private Ausgaben verdrängen. Ein Beispiel für eine Analyse, die sich auf staatliche Ausgaben fokussiert ist Popp (2016). Er untersucht, welchen Einfluss staatliche Ausgaben für F&I im Energiebereich auf im ersten Schritt Publikationen in Zeitschriften und im zweiten Schritt auf Zitationen der Artikel in Patenten haben.

Insgesamt sind empirische Schätzungen auch aufgrund der in Kapitel 4 beschriebenen Herausforderungen nur sehr begrenzt für die Impactanalyse von F&I Maßnahmen einsetzbar.

3.2.4 Indikatorbasierte Analysen

Bei der Indikatorenanalyse (vgl. z.B. Renders et al. (2020)) werden einzelne oder mehrere Indikatoren verwendet, um den Fortschritt bei der Erreichung eines Ziels oder einer bestimmten Wirkung zu verfolgen. Die Indikatoren basieren bestenfalls auf quantitativen Daten, die in der Regel aus einem Monitoringrahmen stammen. Sie können auch qualitativer Natur sein, in dem etwa Fachleute Wirkungen auf einer Skala von 1 bis 5 oder 1 bis 10 abschätzen. Im Zusammenhang mit dem Impact von F&I Maßnahmen haben Peterson et al. (2024) ein qualitatives Indikatorensystem entwickelt, das sowohl für ex-ante also auch ex-post Analysen eingesetzt werden kann.

In Fällen, in denen Politikmaßnahmen unterschiedliche Auswirkungen haben, die mit unterschiedlichen Indikatoren gemessen werden können, können Methoden der Multikriterienanalyse (MKA) eingesetzt werden (vgl. Renders et al. (2020)).

Auch wenn die Indikatoranalyse einen erfolgsversprechenden Ansatz bildet, hat auch sie Limitationen. Diese liegen einerseits in der Datenverfügbarkeit sowie andererseits in den komplexen Wirkketten. Die Datenverfügbarkeit bildet insbesondere ein großes Problem, da bei der Messung von Ful-Wirkketten vielfach keine empirische Grundlage vorhanden ist bzw. nur durch erhebliche Zusatzaufwendungen bei Fördermaßnahmendurchführende bzw. Geförderten zu erheben sind. Hier bilden sich vielfach Hemmnisse diese Zusatzinformationen zu liefern. Auf Seiten der Wirkketten, ist die Schwierigkeit insbesondere in den multiplen Wirkketten zu sehen. Ful-Maßnahmen zielen in den seltensten Fällen auf monolithische Wirkungen ab, sondern inkludieren vielfach diametrale Zielstellungen, die durch sehr heterogene Wirkketten auszeichnen. Angesichts der dargestellten Grenzen der Messbarkeit ist eine indikatorbasierte Analyse der Wirkungen von F&I dennoch – neben den anschließend vorgestellten qualitativen Ansätzen – dennoch vielversprechend. Ein Beispiel ist Box 1 dargestellt.

3.2.5 Qualitative Analysen

Aufgrund der genannten Grenzen quantitativer Ansätze werden in der ex-post Analyse eine Reihe von qualitativen Ansätzen empfohlen, um Evidenz zur Wirkung von Politikmaßnahmen zu erhalten (siehe z.B. Renders et al. (2020)). Dazu zählen Umfragen, systematische Fokusgruppendifkussionen und Experteninterviews. Diese Ansätze können prinzipiell für alle Arten von Politikinstrumenten angewandt werden, also auch für staatliche F&I Förderung.

Box 1: KIM-Tool (Klima- und Innovationsmonitoring-Tool)

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsvorhabens „Der klimapolitische Beitrag von Forschungs- und Innovationsmaßnahmen“ wurde ein webbasierter Pilot für das KIM-Tool (Klima- und Innovationsmonitoring-Tool) entwickelt (siehe auch Peterson et al. 2024). Ziel des Tools ist es, durch eine indikatorenbasierte Analyse die Wirkungen von F&I-Maßnahmen quantifizierbar zu machen.

Das Pilot-KIM-Tool ist so konzipiert, dass ganze Förderrichtlinien bzw. ausgewählte geförderte F&I-Projekte mit Klimaschutzbezug standardisierte Angaben zu ihrem Forschungs- und Entwicklungsstand sowie zu erwarteten mittel- und langfristigen Effekten auf technologische Entwicklungen und deren Potenziale zur Reduktion von Treibhausgasemissionen erfassen. Die Eintragungen der Projekte dienen im ersten Schritt der strukturierten, deskriptiven Darstellung der zu erwartenden Klima- und Innovationswirkungen der Forschungsförderungsportfolios des BMBF sowie der modellhaften Abbildung von Wirkungsketten. Im zweiten Schritt können die erfassten Daten auch zur Analyse von Wirkungen in ex-post- und ex-ante-Perspektive herangezogen werden:

- **Ex-post** könnten die Daten aus dem Tool eine strukturelle Nachzeichnung langfristiger Effekte auf Ebene von Förderlinien ermöglichen – insbesondere dann, wenn regelmäßig Daten erhoben werden und dadurch langfristige Interaktionen zwischen Förderrichtlinien und der Anwendung von Technologien und Lösungen nachvollziehbar werden.
- **Ex-ante** lassen sich durch die Beschreibung erwarteter Emissionswirkungen Rückschlüsse auf das Innovationspotenzial der Vorhaben ziehen. Dies kann zur gezielteren Steuerung von Fördermaßnahmen beitragen, den Vergleich zwischen verschiedenen Maßnahmen erleichtern und mögliche Lücken in der Förderlandschaft identifizieren – etwa dann, wenn bestimmte technologische Entwicklungspfade aus Technologie-Roadmaps in den Projektdaten nur in einem geringen Umfang oder gar nicht abgebildet sind.

Trotz der vielfältigen möglichen Anwendungsfelder unterliegt das KIM-Tool – geleitet von den in diesem Papier dargestellten Argumenten und Erkenntnissen – Einschränkungen hinsichtlich der Kausalität sowie der Verlässlichkeit der Aussagen. Bezogen auf den Zusammenhang zwischen F&I-Maßnahmen und Klimawirkungen liegen diese vor allem in der grundsätzlichen Herausforderung, die Wirkung von F&I-Maßnahmen in einem frühen Stadium der Technologieentwicklung belastbar zu messen – insbesondere mit Blick auf zukünftige Anwendungsfelder, deren technische, strukturelle und gesellschaftliche Rahmenbedingungen heute noch nicht absehbar sind.

Eine weitere Limitation besteht darin, dass die Eintragungen durch die Projekte selbst erfolgen und qualitative sowie schwer standardisierbare Elemente enthalten. Verzerrungseffekte (Biases) können zwar durch konkrete Beispiele für Klassifizierungsskalen oder durch Validierung der Eintragungen z.B. durch externe, unabhängige Expertinnen und Experten reduziert werden, können aber nicht völlig ausgeschlossen werden.

Vor diesem Hintergrund bietet das KIM-Tool einen wichtigen, wenn auch nicht abschließenden Ansatzpunkt, um Wirkungen von F&I Maßnahmen standardisiert zu erfassen, die Angaben deskriptiv aufzuarbeiten sowie für weiterführende deskriptive oder auch statistische Analysen bereitzustellen.

Die in diesem Papier enthaltenen Reflexionen zu den Grenzen der Messbarkeit der Wirkungen von F&I-Maßnahmen sollen dazu beitragen, die Einsatzmöglichkeiten des Tools realistisch einzuordnen und gezielt weiterzuentwickeln.

Diese Art von Analysen sind aufwändig und die Ergebnisse führen nur schwer zu quantitativen Ergebnissen über die Beiträge von Maßnahmen zur Klimaneutralität. Insbesondere die Validität der erhobenen qualitativen Daten in Bezug auf die objektive Einschätzung von Wirkungsmechanismen seitens der Erhebungsquelle ist schwer einzuschätzen. Politische Intentionen, technologische Paradigmagebundenheit und implizite Annahmen können den Objektivitätsgrad der erhobenen Daten deutlich reduzieren. Verknüpft mit Indikatoransätzen können zumindest pseudo-quantitative Ergebnisse abgeleitet werden. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die verschiedenen Ansätze und ihre Herausforderungen und Grenzen.

Tabelle 2 Übersicht über methodische Ansätze zur Impactanalyse

Ansatz	Beschreibung	Anforderungen	F&I Spezifika	Ex-ante / ex-post	Aufwand	Fazit
Einfache bottom-up Berechnung	Berechnung von Emissionsreduktion durch direkten Technologievergleich	Nur möglich, wenn direkter Vergleich von Technologien möglich	Nur für hohe TRL und Förderung des Einsatzes neuer Technologien geeignet. Nicht möglich für klassische F&I Förderung in niedrigen TRL oder außerhalb Technologieförderung	Ex-ante & ex-post	Gering	Sehr begrenzte Einsatzmöglichkeiten bei F&I Maßnahmen
Quantitative Modellierung	Gesamtwirtschaftliche / sektorspezifische Analysen der Auswirkungen von Politikmaßnahmen auf Emissionen und Kosten / Wohlfahrt	Modellierungsteam & aufwändige Modellpflege & -analysen notwendig.	Begrenzte Abbildung techn. Fortschritts; begrenzte Möglichkeiten F&I Maßnahmen zu integrieren. Nicht möglich für klassische F&I Förderung in niedrigen TRL oder außerhalb Technologieförderung	Primär ex-ante, ex-post möglich	Hoch	Sehr begrenzte Einsatzmöglichkeiten bei F&I Maßnahmen
Empirische Schätzungen	Regressionsanalysen, um Auswirkungen einer Politik zu schätzen	Verfügbarkeit von Daten / Zeitreihen über relevante Auswirkungen und Einflussvariablen.	Kausalität angesichts langer Wirkzeiträume und komplexer Interaktionen schwer abzuleiten; Probleme mit Datenverfügbarkeit	Ex-post	Hoch	Sehr begrenzte Einsatzmöglichkeiten bei F&I Maßnahmen
Indikatorenanalyse	Definition von Indikatoren um Zielerreichung / Wirkung zu bestimmen	Verfügbarkeit von Daten / Zeitreihen über die Wirkung von F&I auf Emissionen	Angesichts komplexer Wirkungsketten vor allem für Outputs und Outcomes geeignet	Ex-ante & ex-post	Mittel	Hohes Potenzial für F&I Maßnahmen
Qualitative Ansätze	Umfragen, Fokusgruppen Diskussionen, Experteninterviews	Versuch mehr als Meinungen zu erhalten in Form validierbarer Aussagen	Angesichts komplexer Wirkungsketten vor allem für Outputs und Outcomes geeignet	Ex-ante & ex-post	Mittel	Hohes Potenzial für F&I Maßnahmen, aber nur qualitative Ergebnisse

Quelle: Eigene Darstellung.

4 Herausforderungen und Grenzen der Evaluation

Allgemein sind Evaluationen von Politikmaßnahmen durch eine Reihe von Herausforderungen und Grenzen gekennzeichnet (vgl. z.B. Renders et al. (2020), Kapitel 5), die speziell für F&I Maßnahmen von besonderer Bedeutung sind. Hinzukommen spezifischere Herausforderungen für staatliche F&I Maßnahmen, die sich auf den Klimaschutz fokussieren. Dabei kann man zwei große Arten von Herausforderungen unterscheiden, die jeweils einzelne Unterpunkte aufweisen. Die erste Herausforderung ist, dass die Wirkungen anders als vereinfacht in Abbildung 1 dargestellt nicht linear sind, sondern mit zahlreichen externen Faktoren interagieren und von ihnen probabilistisch beeinflusst werden. Die zweite Herausforderung ist methodischer Art und bezieht sich auf inhärente Erfassungsprobleme.

4.1 Nicht lineare und indirekte Effekte

Ausgehend von einem üblichen Evaluierungsansatz wie in Abbildung 1 dargestellt, wird eine Bewertung schwieriger, wenn man von einer Komponente des linearen Bewertungsmodells zur nächsten übergeht. Inputs und Aktivitäten sind in der Regel bekannt und in der Regel Bestandteil von Projektanträgen und Projektberichten. Bereits die Outputs, aber noch mehr die Ergebnisse (Outcomes) und Wirkungen (Impacts) von F&I Politiken hängen von vielfältigen und sehr individuellen externen Faktoren ab, die die beabsichtigten Wirkungen auf vielfältige Weise beeinflussen und auch zu unbeabsichtigten Nebeneffekten führen können. In der Literatur werden drei Arten von nicht-linearen und indirekten Effekten besonders hervorgehoben. Sie liegen meist außerhalb des Rahmens der F&I Förderung und sind daher nicht deterministisch steuerbar.

4.1.1 Politikinteraktionen und Systemeffekte

Wie auch Renders et al. (2020) hervorhebt, funktionieren Politikmaßnahmen nie in einem Vakuum, sondern werden in einem komplexen Umfeld mit bereits bestehenden, vielfältigen Klima-, Umwelt-, Energie- und anderen Politiken umgesetzt. Nichtlineare Wechselwirkungen zwischen diesen Politiken sind die Regel und nicht die Ausnahme. Im besten Fall können Wechselwirkungen genutzt werden, um verschiedene Maßnahmen zu kombinieren, die sich gegenseitig verstärken. Oft führen die überlappenden Politikmaßnahmen aber auch zu unerwarteten oder sogar unerwünschten Effekten und Zusatzkosten (vgl. z.B. in unterschiedlichen klimapolitischen Kontexten Böhringer et al. (2016); Fischer und Preonas (2010) und Rosenow et al. (2016)). Peterson et al. (2024) diskutieren, dass der Beitrag von F&I Maßnahmen zu Emissionsminderungen auf gesamtwirtschaftlicher oder Makroebene u.a. zentral davon abhängt, ob ein Emissionshandelssystem mit festgelegter Obergrenze existiert, so wie es in der EU für den Stromsektor und die energieintensive Industrie der Fall ist. In diesem Fall kann es zwar Emissionseinsparungen auf Produkt- bzw. Mikroebene sowie auf Sektorebene kommen – etwa durch den vermehrten Einsatz von grünem Stahl. Auf EU-Ebene im Rahmen des genannten Emissionshandelssystems und – seit der 2. Novelle des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) – auch in Deutschland werden Emissionen jedoch sektorübergreifend als aggregierte Gesamtmenge innerhalb des jeweiligen Anwendungsbereichs betrachtet. Dadurch können Emissionsminderungen in einem Sektor dazu führen, dass andere Sektoren mehr emittieren dürfen, solange die übergreifende Gesamtemissionsgrenze nicht überschritten wird. Entscheidend für mögliche sektorübergreifende Verlagerungen sind dabei stets die spezifischen Regelungsgrenzen des jeweiligen klimapolitischen Instruments. Der Beitrag der F&I Maßnahme ist dann eine Kostensenkung. Eventuell kann die gewonnene Kosteneffizienz durch die F&I Maßnahme zudem das Risiko der Verlagerung von Emissionen verhindern und so auf globaler Ebene eine gewisse Emissionssenkung erreichen. In Kombination mit anderen klimapolitischen Instrumenten

– wie Steuern oder Standards ist der Fall anders gelagert. Insofern ist für ein Impact-Assessment von F&I Maßnahmen insbesondere in Bezug auf ihre Emissionswirkung eine Berücksichtigung der Politikinteraktionen wichtig. Dabei kann es oft angezeigt sein, ein komplettes Politikpaket gemeinsam zu evaluieren, statt dies für einzelne Maßnahmen zu tun. Dies wird in der Fachcommunity zum Beispiel im Zusammenhang mit der Evaluierung des deutschen Klimaschutzprogramms empfohlen und gerade von Seite der Modellierung wird darauf hingewiesen, dass eine Einzel-Instrument-Analyse und vielfach auch eine nur auf einen Sektor ausgerichtete Analyse wenig sinnvoll ist (vgl. Expertenrat für Klimafragen (2024, Kap. 4)). Renders et al. (2020) schlagen als Startpunkt von Analysen ein Mapping der relevanten Interaktionen vor und auf der Basis dann quantitative und qualitative Bewertungen, die im Prinzip auf den im vorherigen Kapitel genannten Instrumenten beruhen.

Verknüpft mit indirekten Effekten, aber sogar weiter gefasst sind System- und Netzwerkeffekte (vgl. auch Peterson et al. (2024)). So ist etwa Wasserstoff Teil einer Netto-Null-Wirtschaft, und kann in mehreren verschiedenen Sektoren und Anwendungen eingesetzt werden. Dabei hängen die Auswirkungen von Wasserstoff mit anderen Technologien zusammen. So ist der Emissionseffekt des Wasserstoffs nicht nur davon abhängig wie er produziert wird, sondern auch welche fossilen Anwendungen von Kraftstoffen durch ihn substituiert werden. In ähnlicher Weise ist die Entwicklung von Batterien entscheidend für ein auf erneuerbaren Energien basierendes Energiesystem, und die Auswirkungen von Batterien auf Emissionen und Kosten können nur auf der Systemebene bewertet werden. Beim genannten Beispiel grüner Stahlproduktion hängt die Menge des produzierten Stahls von der langfristigen Wettbewerbsfähigkeit der grünen Stahlproduktion und den verfügbaren Ersatzstoffen ab. Ein „optimales“ Netto-Null-Szenario könnte beispielsweise eine stärkere Verwendung von Holz im Bausektor, leichtere Autos und insgesamt weniger Stahlproduktion als heute beinhalten, so dass die Emissionseinsparungen gegenüber einem ex-post identifizierten Emissionspfad überschätzt würden, wenn man die Differenz der Emissionen pro Tonne Stahl berechnet und mit der heutigen Stahlproduktion multipliziert.

Systemeffekte werden auch für immaterielle Ergebnisse wie bessere Mobilitätskonzepte oder ein größeres Wissen über den Klimawandel in der Gesellschaft relevant. Insgesamt ist die Analyse von Politikinteraktionen für F&I Maßnahmen im vorhandenen komplexen Politikumfeld eine Herausforderung.

4.1.2 Rebound-Effekte

Im Zusammenhang speziell mit Emissionswirkungen spielen sogenannte Rebound-Effekte (oder Bumerang Effekte) eine große Rolle (vgl. Expertenrat für Klimafragen (2022)). Sie sorgen dafür, dass Effizienzsteigerungen und damit Emissionseinsparungen auf Produkt- oder Haushaltsebene bzw. der Mikroebene häufig nicht zu Emissionseinsparungen auf Meso- oder Makroebene führen. Dies liegt daran, dass mit der Effizienzsteigerung oft die Nachfrage nach dem Gut steigt (direkter Rebound-Effekt). So steigt etwa der Stromverbrauch (und die Emissionen), wenn bei Umstellung auf energiesparende LED mehr Lampen installiert werden oder bei zunehmend energiesparenderen Kühlschränken die Größe oder auch die Anzahl in den Haushalten steigt. Im Fall der Automobilindustrie ist es beispielsweise gelungen, die Emissionen pro PS von 1990 bis 2019 um etwa 50 % zu senken, gleichzeitig hat sich aber die durchschnittliche PS-Zahl pro Auto mehr als verdoppelt⁵. Ein weiterer Effekt ist, dass Effizienzsteigerungen auf Ebene von Haushalten verfügbares Einkommen einsparen, der eingesparte Anteil dann aber für andere Güter und Dienstleistungen ausgegeben wird, die wiederum zu zusätzlichen THG-Emissionen

⁵ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/399048/umfrage/entwicklung-der-co2-emissionen-von-neuwagen-deutschland/>, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/249880/umfrage/ps-zahl-verkaufter-neuwagen-in-deutschland/>. Beide abgerufen September 2024,

führen⁶. Auf makroökonomischer Ebene senkt beispielsweise die zusätzlich verfügbare Energie den Preis, was wiederum die Nachfrage stimuliert.

Zahlreiche Studien haben versucht die verschiedenen Arten von Rebound-Effekten zu quantifizieren (siehe z.B. Gillingham, Rapson und Wagner (2016); Rajabi (2022); Sorrell, Gatersleben und Druckman (2020) für relative neue Überblicksartikel mit verschiedenen Foki). Die Effekte sind sehr kontextspezifisch und hängen von der speziellen Maßnahme und ihrem Umfeld ab. Während einige Studien nur geringe Rebound-Effekte zeigen, die dazu führen, dass wenige Prozent der eigentlichen Emissionsreduktionen dadurch entfallen, führen diese Effekte in anderen Studien dazu, dass sogar mehr Emissionen entstehen als ohne eine gewisse Maßnahme. Gillingham, Rapson und Wagner (2016) kommen zu dem Schluss, dass sich keine überzeugenden Belege für die Behauptung, finden, dass Energieeffizienzgewinne durch den Rebound-Effekt wieder zunichte gemacht werden. Der gesamte mikroökonomische Rebound-Effekt liegt laut dieser Studie in den meisten Fällen in der Größenordnung von 20 bis 40 Prozent. Über den makroökonomischen Rebound ist weitaus weniger bekannt; er ist aber vermutlich auch weniger als 100 Prozent. Zum Einsatz kommen bei den Abschätzungen erneut ökonometrische Studien und ökonomische Modellierung, jeweils sowohl auf Makro-, als auch Mikroebene (vgl. auch Renders et al. (2020)). Der Expertenrat für Klimafragen hat ebenfalls den Einfluss von Rebound-Effekten untersucht und stellt durchaus erhebliche Einflüsse fest, insbesondere in den Aktivitäten in wirtschaftlich schwächeren Haushalten (Expertenrat für Klimafragen 2022).

In Zusammenhang mit staatlicher F&I Förderung sind Rebound-Effekte vor allem dort relevant, wo es um die Förderung von Energieeffizienzmaßnahmen oder energiesparenden Technologien geht.

4.1.3 Verdrängungs- und Trittbrettfahrer-Effekte

Politische Strategien und Maßnahmen, die wie F&I Maßnahmen finanzielle Unterstützung bereitstellen können zu Verdrängungs- oder Trittbrettfahrerverhalten führen. Die Wirtschaftsakteure nehmen die finanzielle Unterstützung in Anspruch, obwohl sie zumindest einen Teil der Investition oder Verhaltensänderung hin zu BEVs auch ohne die Unterstützung durchgeführt hätten (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI und Technopolis Deutschland GmbH 2024). Speziell kann staatliche F&I Förderung private F&I Investitionen verdrängen. Wenn der Zeitpunkt einer Subvention vorweggenommen wird und vorhersehbar ist, kann (vgl. European Commission et al. (2020)) dies sogar dazu führen, dass eine Aktivität verschoben wird, bis die Maßnahme freigegeben wird und diese Verzögerungen führt insgesamt sogar zu negativen Auswirkungen.

Diese Effekte sind insgesamt schwer zu erfassen. Renders et al. (2020) schlägt für ex-post Analysen Surveys, Interviews und statistische und ökonometrische Analysen vor. Dort werden auch einige Studien zitiert, die Trittbrettfahrer-Effekte näher untersuchen. Für den F&I Bereich sind diese Effekte potenziell immer relevant, wenn es um Technologieförderung geht.

4.2 Inhärente Erfassungsprobleme

Weitere in der Literatur diskutierte Herausforderungen einer Impact-Analyse beziehen sich auf die Charakteristika der Maßnahmen und die Erhebungsmethoden. Hierunter fallen die folgenden drei Arten von Herausforderungen.

⁶ Weil der Effekt außerhalb des Zielsektors liegt, wird er nach der klassischen Definition nicht als Rebound-Effekt bezeichnet. Die Wirkung ist aber vergleichbar.

4.2.1 Zeitliche Diskrepanz zwischen Maßnahme und Wirkung

Zwischen F&I Maßnahmen, Outputs, Outcomes und schließlich Impacts liegt oft eine lange Zeitspanne. So zeigt etwa eine Studie von Popp (2016), dass eine zusätzliche staatliche Förderung in Höhe von 1 Million US-Dollar im ersten Schritt zu ein bis zwei zusätzlichen Veröffentlichungen als Outcome führt, allerdings mit einer Verzögerung von bis zu zehn Jahren zwischen der ersten Förderung und der Veröffentlichung. In Patenten zitiert werden weniger als 10 Prozent der Artikel, und die Zahl der Zitate nimmt bis etwa 6 Jahre nach der Förderung nur geringfügig zu und der Effekt pendelt sich erst 18 Jahre nach der Förderung ein. Diese Zahlen zeigen, dass die Auswirkungen der öffentlichen F&I Förderung im Energiebereich möglicherweise erst mehrere Jahre nach der Förderung spürbar werden. Zudem ist der Zeitplan für F&I Projekte zur Verringerung von Treibhausgasemissionen oft nicht einheitlich. Die Forschung am Fusionsreaktor ITER veranschaulicht das Problem. Obwohl die Einführung der Fusionsreaktoren auf der Erde die Erzeugung von erneuerbarem Strom stark verbessern kann, hat sich der voraussichtliche Zeitpunkt der Einführung der Fusionsreaktoren als Gebrauchsgegenstand regelmäßig geändert, und es ist immer noch nicht klar, wann und ob überhaupt diese Technologie in größerem Maßstab anwendbar sein wird. Dementsprechend sind sowohl der Zeitpunkt als auch die damit verbundene Verringerung der Treibhausgasemissionen nicht quantifizierbar. Die Auswirkungen der F&I Förderung hängen daher in hohem Maße von den Fortschritten der Forschung im Bereich der Kernfusion ab. Da das Konzept zur Verringerung der THG-Emissionen jedoch auf einem Budgetansatz beruht, bei dem die zu einem bestimmten Zeitpunkt (n) in der Zukunft realisierten Emissionen weniger von Interesse sind als die kumulierten THG-Emissionen von heute bis zum Zeitpunkt (n) in der Zukunft, ist die zeitliche Perspektive aus der Klimaschutzperspektive von zentraler Bedeutung.

4.2.2 Unsicherheit

Auf sehr langfristige Ziele ausgerichtete F&I-Maßnahmen, deren Ausgestaltung zum Zeitpunkt der Förderung kaum abzuschätzen sind, weisen eine weitere Herausforderung auf. Jeder Analyseschritt ist von Unsicherheiten begleitet, und mit jedem, der in Abbildung 1 skizzierten Schritte, werden die Abschätzungen unsicherer (Expertenrat für Klimafragen 2024). Dies ist nicht nur naturgemäß für ex-ante Analysen ein Problem, sondern auch für ex-post Analysen. So ist beispielsweise unsicher, wie genau das Vergleichsszenario ohne Politikmaßnahme ausgesehen hätte, an verschiedenen Stellen müssen grobe Annahmen getroffen werden, die beschriebenen Indirekten- und Systemeffekte, die Rebound- und Verdrängungseffekte sind ebenfalls unsicher und das Ergebnis aller Evaluationsmethode, ob quantitativ oder qualitativ, ist von Natur aus mit einem gewissen Grad an Unsicherheit behaftet. Für F&I Maßnahmen sind diese Unsicherheiten aufgrund der komplexen Wirkmechanismen und langen Wirkzeiträume besonders groß.

4.2.3 Aufwand, Daten- und Modellverfügbarkeit

Im Zusammenhang mit der Evaluation von Maßnahmen mit Hilfe quantitativer Modelle wurde bereits der damit verbundene Aufwand dargestellt und diskutiert, dass es spezifischer Modelle für unterschiedliche Fragenstellungen bedarf. An anderen Stellen wurde die Datenverfügbarkeit thematisiert. Diese ist gerade für empirische Studien eine Herausforderung, da hier besondere Ansprüche an Datenverfügbarkeit gestellt werden. Tabelle 3 fasst die diskutierten Herausforderungen und Grenzen zusammen.

Tabelle 3 Übersicht über methodische Ansätze zur Impactanalyse

Herausforderung	Beschreibung	Implikationen
A) Nicht-lineare und indirekte Effekte	Komplexe Interaktion von F&I Maßnahmen mit zahlreichen externen Faktoren	Wirkung von F&I Maßnahmen schwer zu isolieren und i.d.R. nicht steuerbar
Politikinteraktionen und Systemeffekte	Interaktion von F&I Maßnahmen mit anderen Politikmaßnahmen	Wirkung von F&I Maßnahmen nur im Zusammenspiel mit anderen Politikmaßnahmen oder in Szenarien analysierbar
Rebound-Effekte	Effizienzsteigerungen auf der Mikroebene führen nicht zwangsläufig zu Einsparungen auf Meso- oder Makroebene, da diese durch Mehrverbrauch in anderen Bereichen teilweise oder vollständig aufgehoben werden	Analyse von Mikroebene hat begrenzte Aussagekraft
Verdrängungs- und Trittbrettfahreneffekte	Die Wirtschaftsakteure nehmen staatliche finanzielle Unterstützung in Anspruch, obwohl sie Investition oder Verhaltensänderung z.T. auch ohne die Unterstützung durchgeführt hätten	Verringerte private Investitionen in F&I Maßnahmen (Verdrängungseffekt); strategisches Handeln und Verzögerung von Investitionen in F&I Maßnahmen
B) Inhärente Erfassungsprobleme	Inhärente Charakteristika von F&I beeinflussen Wirkungsanalyse	F&I Charakteristika erschweren Wirkungsanalyse
Zeitliche Diskrepanz Wirkung & Maßnahme	F&I Maßnahmen wirken erst sehr zeitversetzt	Erschwerte Identifikation von Wirkungen, Maßnahme erst mit Zeitverzögerung evaluierbar, hohe Datenanforderungen
Unsicherheit	Komplexes Wirkungsmodell von F&I ist in besonderem Maße von Unsicherheiten gekennzeichnet	Erschwerte Evaluation und hohe Unsicherheit der Ergebnisse
Aufwand, Daten- & Modellverfügbarkeit	Hoher Aufwand und mangelnde Daten- und Modellverfügbarkeit für Analyse von F&I	Evaluation sind praktische Grenzen gesetzt

Quelle: Eigene Darstellung.

5 Fazit

In den vorherigen Kapiteln wurde gezeigt, dass die Wirkung staatlicher Forschungs- und Innovationsförderung (F&I) grundsätzlich systematisch analysiert werden kann – etwa durch lineare Wirkmodelle und eine Vielzahl verfügbarer Methoden zur Abschätzung einzelner Wirkungsschritte. Allerdings wurde ebenso deutlich, dass insbesondere quantitative Bewertungsmethoden in der Praxis auf erhebliche Herausforderungen stoßen: F&I-Maßnahmen sind oft durch lange Zeiträume zwischen Förderung und Wirkung, komplexe Wirkungsketten sowie hohe Unsicherheiten und indirekte Effekte geprägt. Dementsprechend ist auch das Potenzial zur Quantifizierung von THG-Emissionseinsparungen von F&I Maßnahmen begrenzt. Die Herausforderung, die Auswirkungen von Maßnahmen auf Emissionen zu validieren, zeigt sich etwa bei der Analyse der Folgenabschätzung des deutschen Klimaschutzprogramms. Wie vom Expertenrat für Klimafragen (2022) erörtert, ist eine eindeutige qualitative oder quantitative Abschätzung der Auswirkung auf die THG-Emissionen für die meisten der im Programm aufgeführten Maßnahmen, zu denen auch zahlreiche F&I Maßnahmen zählen, nicht möglich. Besonders schwer ist die Abschätzung der Wirkung von F&I Maßnahmen, die auf immaterielle Aktivitäten abzielen.

Staatliche F&I-Maßnahmen, die zur Minderung von THG-Emissionen beitragen sollen, entfalten ihre Wirkung in der Regel nicht ausschließlich über direkte Emissionsreduktionen. Ebenso bedeutsam sind weitere Effekte wie die Senkung von Technologiekosten oder

Systemwirkungen – etwa durch Innovationen, die strukturelle Veränderungen in ganzen Sektoren oder Wertschöpfungsketten anstoßen. Für Kostensenkungen sind die verfügbaren Methoden zur Evaluation der Effekte und ihrer Grenzen ähnlich wie für Emissionssenkungen. Systemeffekte sind noch schwerer zu evaluieren.

In Anbetracht der beschriebenen Komplexität ist eine Bewertung der Auswirkungen von F&I Finanzierungen auf die Verringerung der Treibhausgasemissionen, aber auch allgemeiner auf die Klimaneutralität oft quantitativ nicht machbar. Daher muss im Zweifel auf indikatorbasierte oder rein qualitativ basierte Verfahren zurückgegriffen werden. Ein Beispiel für ein solches indikatorbasiertes Verfahren, das im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsvorhabens „Der klimapolitische Beitrag von Forschungs- und Innovationsmaßnahmen“ entwickelt wurde, wurde in Box 1 kurz vorgestellt. Es bietet zumindest eine Möglichkeit, wie Treibhausgas-minderungspotenziale durch F&I Maßnahmen systematisch analysiert und zu einem gewissen Grad gemessen werden können.

Literaturverzeichnis

- Böhringer, Christoph, Andreas Keller, Markus Bortolamedi, and Anelise Rahmeier Seyffarth. 2016. 'Good Things Do Not Always Come in Threes: On the Excess Cost of Overlapping Regulation in EU Climate Policy'. *Energy Policy* 94:502–8. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.12.034>.
- European Commission. 2023. '“Better Regulation” Toolbox – July 2023 Edition'. European Commission. https://commission.europa.eu/law/law-making-process/planning-and-proposing-law/better-regulation/better-regulation-guidelines-and-toolbox_en.
- . 2024a. 'Innovation Fund (InnovFund) - Annex C: Methodology for GHG Emission Avoidance Calculation'. https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/innovfund/guidance/ghg-emission-avoidance-methodology_innovfund_en.pdf.
- . 2024b. 'Modelling Tools for EU Analysis'. 2024. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/economic-analysis/modelling-tools-eu-analysis_en.
- European Commission, Ricardo Energy & Environment, Nikolas Hill, Sofia Amaral, Samantha Morgan-Price, Tom Nokes, Judith Bates, et al. 2020. *Determining the Environmental Impacts of Conventional and Alternatively Fuelled Vehicles through LCA: Final Report*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2834/91418>.
- Expertenrat für Klimafragen. 2022. 'Zweijahresgutachten 2022 - Gutachten zu bisherigen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen, Trends der Jahresemissionsmengen und Wirksamkeit von Maßnahmen (gemäß § 12 Abs. 4 Bundes-Klimaschutzgesetz)'. Berlin. https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2022/11/ERK2022_Zweijahresgutachten.pdf.
- . 2024. 'Gutachten zur Prüfung der Treibhausgas-Projektionsdaten 2024 - Sondergutachten gemäß § 12 Abs. 4 Bundes-Klimaschutzgesetz'. Berlin. https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2024/06/ERK2024_Sondergutachten-Pruefung-Projektionsdaten-2024.pdf.
- . 2025. 'Zweijahresgutachten 2024. Gutachten zu bisherigen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen, Trends der Jahresemissionsgesamtmengen und Jahresemissionsmengen sowie Wirksamkeit von Maßnahmen (gemäß § 12 Abs. 4 Bundes-Klimaschutzgesetz)'. Berlin. https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2025/03/ERK2025_Zweijahresgutachten-2024.pdf.

- Fischer, C., and L. Preonas. 2010. 'Combining Policies for Renewable Energy. Is the Whole Less Than the Sum of Its Parts?' *International Review of Environmental and Resource Economics* 4. <https://doi.org/10.1561/101.00000030>.
- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, and Technopolis Deutschland GmbH. 2024. 'Evaluation der „Richtlinie zur Förderung des Absatzes von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Umweltbonus)“ - Abschlussbericht (Förderzeitraum: 2016-2023, gesamter Förderzeitraum)'. Karlsruhe, Berlin. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/evaluation-der-richtlinie-zur-foerderung-des-absatzes-von-elektrisch-betriebenen-fahrzeugen.pdf?__blob=publicationFile&v=4.
- Gillingham, Kenneth, David Rapson, and Gernot Wagner. 2016. 'The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy'. *Review of Environmental Economics and Policy* 10 (1): 68–88. <https://doi.org/10.1093/reep/rev017>.
- Griniece, Elina, Jelena Angelis, Alasdair Reid, Silvia Vignetti, Jessica Catalano, Ana Helman, Matias Barberis Rami, and Henning Kroll. 2020. 'Guidebook for Socio-Economic Impact Assessment of Research Infrastructures', June. <https://zenodo.org/records/3950043>.
- International Energy Agency. 2021. 'Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector'. Report. Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- Köhler, Jonathan, Michael Grubb, David Popp, and Ottmar Edenhofer. 2006. 'The Transition to Endogenous Technical Change in Climate-Economy Models: A Technical Overview to the Innovation Modeling Comparison Project'. *The Energy Journal* 27 (1_suppl): 17–56. <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-VolSI2006-NoSI1-2>.
- Matthes, Felix, Ortwin Renn, Roman Mendelevitch, Christina Camier, and Tatjana Kiesow. 2021. 'Orientierungshilfe „Good Practice“ für Ex-Ante-Evaluierungen von Klimaschutzmaßnahmen - WPKS'. Wissenschaftsplattform Klimaschutz. <https://www.wissenschaftsplattform-klimaschutz.de/de/Orientierungshilfe-Good-Practice-fur-Ex-Ante-Evaluierungen-von-Klimaschutzmassnahmen-1741.html>.
- Meissner, Leonie P., Sonja Peterson, and Finn Ole Semrau. 2024. 'It's Not a Sprint, It's a Marathon: Reviewing Governmental R&D Support for Environmental Innovation'. *Journal of Environmental Planning and Management* 0 (0): 1–27. <https://doi.org/10.1080/09640568.2024.2359442>.
- Miedzinski, Michal, Rebecca Allinson, Erik Arnold, Elina Griniece, Jennifer Cassingena Harper, Asel Doranova, Stefan Giljum, Viola Peter, Klaus Kubeczko, and Bea Mahieu. 2013. 'A Short Guide to Assessing Environmental Impacts of Research and Innovation Policy'.
- Nikas, Alexandros, Haris Doukas, and Andreas Papandreou. 2019. 'A Detailed Overview and Consistent Classification of Climate-Economy Models'. In *Understanding Risks and Uncertainties in Energy and Climate Policy: Multidisciplinary Methods and Tools for a Low Carbon Society*, edited by Haris Doukas, Alexandros Flamos, and Jenny Lieu, 1–54. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03152-7_1.
- Ökoinstitut. 2023. 'Projektionsbericht 2023 für Deutschland'. Umweltbundesamt.
- Peterson, Sonja, Finn Ole Semrau, Heimer, Thomas, Marius Alt, Julian Schaper, and Helen Garber. 2024. 'Assessing the adequacy and impact of research and innovation policy towards a climate neutral economy'. Technopolis Group. <https://www.technopolis-group.com/report/assessing-the-adequacy-and-impact-of-research-and-innovation-policy-towards-a-climate-neutral-economy/>.

- Popp, David. 2016. 'Economic Analysis of Scientific Publications and Implications for Energy Research and Development'. *Nature Energy* 1 (4): 1–8.
- Rajabi, Mona Mashhadi. 2022. 'Dilemmas of Energy Efficiency: A Systematic Review of the Rebound Effect and Attempts to Curb Energy Consumption'. *Energy Research & Social Science* 89 (July):102661. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102661>.
- Renders, N., T. Dauwe, Tatiana Pasquel Garcia, Hannah Förster, Sabine Gores, Katja Schumacher, Viktoria Noka, Florianne de Boer, Daniel Forster, and Samantha Morgan-Price. 2020. 'Guidance Document for Ex-Post Evaluation of Climate Policies in Effort Sharing Sectors'. https://effortsharing.ricardo-aea.com/sites/default/files/inline-files/Guidance_ExPostEvaluation_EffortSharing_Sept2020_0.pdf.
- Rich, David, Pankaj Bhatia, Jared Finnegan, Kelly Levin, and Apurba Mitra. 2014. *Policy and Action Standard - An Accounting and Reporting Standard for Estimating the Greenhouse Gas Effects of Policies and Actions*. <https://www.wri.org/research/policy-and-action-standard>.
- Rosenow, Jan, Tina Fawcett, Nick Eyre, and Vlasia Oikonomou. 2016. 'Energy Efficiency and the Policy Mix'. *Building Research & Information* 44 (5–6): 562–74. <https://doi.org/10.1080/09613218.2016.1138803>.
- Schlomann, Barbara, Iska Brunzema, Andreas Kemmler, Veit Bürger, and Roman Mendelevitch. 2022. 'Methodikpapier zur ex-ante Abschätzung der Energie- und THG-Minderungswirkung von energie- und Klimaschutzpolitischen Maßnahmen'. <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/441412>.
- Schlomann, Barbara, Fabian Voswinkel, Simon Hirzel, Angelika Paar, Dominik Jessing, Stephan Heinrich, Oliver Antoni, and Markus Kahles. 2020. 'Methodik-Leitfaden für Evaluationen von Energieeffizienzmaßnahmen'. Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/M-O/methodik-leitfaden-fuer-evaluationen-von-energieeffizienzmassnahmen.html>.
- Sorrell, Steve, Birgitta Gatersleben, and Angela Druckman. 2020. 'The Limits of Energy Sufficiency: A Review of the Evidence for Rebound Effects and Negative Spillovers from Behavioural Change'. *Energy Research & Social Science* 64 (June):101439. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101439>.
- United Nations Climate Change. 2024. 'Modelling Tools to Assess the Impact of the Implementation of Response Measures'. 2024. <https://unfccc.int/topics/mitigation/workstreams/response-measures/modelling-tools-to-assess-the-impact-of-the-implementation-of-response-measures>.

