Elektrifizierung
der Industrie



QUERSCHNITTSFORMAT ÜBERTRAGUNGS- UND VERTEILNETZ

Hemmnisse der Transformation: Handlungsbedarfe identifizieren, Lösungen aufzeigen.

Diskussionspapier aus dem
Kooperationsforum Elektrifizierung der Industrie

Hemmnisse der Transformation: Handlungsbedarfe identifizieren, Lösungen aufzeigen.

Diskussionspapier aus dem Kooperationsforum Elektrifizierung der Industrie



Die Inhalte des Diskussionspapiers stellen eine neutrale Zusammenfassung der Diskussion im Forum dar. Sie bilden daher unterschiedliche Perspektiven ab, spiegeln jedoch nicht zwangsläufig die Positionen, Meinungen oder Interessen einzelner teilnehmender Unternehmen wider.

Die dargestellten Lösungsansätze wurden von der FfE auf Grundlage der Diskussion sowie eigener Analysen entwickelt und mit den Teilnehmenden konsultiert. Die Zustimmung der Forumsmitglieder zu den Lösungsansätzen und Kernaussagen wurde an den entsprechenden Stellen im Dokument kenntlich gemacht.

Impressum

Herausgeber



Am Blütenanger 71
80995 München
+49 (0)89 158121-0
info@ffe.de
www.ffe.de

Diskussionspapier aus dem Kooperationsforum Elektrifizierung der Industrie
Teil der Initiative der FfE-Kooperationsforen

Veröffentlicht am
31.08.2026

Projektleitung
Hannes Kracht

Weitere Bearbeiter:innen
Ryan Harper
Frank Veitengruber
Dr.-Ing. Anna Gruber

Geschäftsleitung
Dr.-Ing. Serafin von Roon
Dr.-Ing. Anna Gruber
Dr.-Ing. Andrej Guminski

Teilnehmer im Kooperationsforum Elektrifizierung der Industrie
(Stand Juli 2025)
- AlzChem Group
- Aurubis AG
- Currenta GmbH
- Entelios AG
- Fritz Winter Eisengießerei GmbH & Co. KG
- Gunvor Raffinerie Ingolstadt GmbH
- InfraServ Gendorf
- Karwendel-Werke Huber GmbH
- MAGNA International Europe GmbH
- Unternehmensgruppe Max Bögl
- Merck KGaA
- N-ERGIE Aktiengesellschaft
- UPM GmbH
- VK Energie GmbH
- Volkswagen Group Services GmbH

Bitte zitieren als
FfE (2026): Hemmnisse der Transformation: Handlungsbedarfe identifizieren, Lösungen aufzeigen. Diskussionspapier aus dem Kooperationsforum Elektrifizierung der Industrie.

Versionsnummer Vorlage: TL20230613

Inhaltsverzeichnis

Hemmnisse der Transformation: Handlungsbedarfe identifizieren – Lösungen aufzeigen. 5

1 Zentrale Hemmnisse überwinden – eine zukunftsfähige Industrie ermöglichen 7

2 Technische Lücken: Wo Elektrifizierung alleine (noch) nicht ausreicht 8

2.1 Elektrifizierung als Lösung für viele industrielle Anwendungen 8

2.2 Energieträgerwechsel als Alternative? 10

3 Wirtschaftliche Lücken: Technisch verfügbar, aber der Business Case fehlt 13

4 Von der Theorie in die Praxis: Woran gute Konzepte scheitern 16

4.1 Politisch & regulatorisch: Offene Fragen und mangelnde strategische Kontinuität 17

4.2 Technisch & technologisch: Marktreife allein führt nicht automatisch zur Umsetzung 19

4.3 Weitere Hemmnisse: Randthemen mit großer Wirkung 20

5 Abbau praktischer Umsetzungshemmnisse zur Aktivierung von Investitionen 23

Zur Initiative der Kooperationsforen 25

Literaturverzeichnis 26

Hemmnisse der Transformation: Handlungsbedarfe identifizieren – Lösungen aufzeigen.

Die Transformation der Industrie erfordert neben der technischen Verfügbarkeit von Elektrifizierungs- und Energieträgerwechseltechnologien vor allem wirtschaftlich tragfähige, regulatorisch verlässliche und praxistauglich umsetzbare Lösungsoptionen.

Die Diskussionen im Kooperationsforum Industrie zeigen: Viele Maßnahmen zur CO_2-Verminderung sind grundsätzlich marktreif und bekannt, scheitern jedoch teilweise an fehlenden Business Cases, unsicheren und ungeeigneten Rahmenbedingungen, begrenzten Netzanschlusskapazitäten oder standortspezifischen Restriktionen. Ziel muss es daher sein, Hemmnisse nicht isoliert zu betrachten, sondern technische, wirtschaftliche und organisatorische Anforderungen gemeinsam zu adressieren. So können Unternehmen befähigt werden, belastbare Transformationspfade zu entwickeln und Investitionen in eine zukunftsfähige Industrie umzusetzen.

1

Technische Lücken: Elektrifizierung ist ein wichtiger Baustein für Wettbewerbsfähigkeit und Treibhausgasminderung, reicht jedoch nicht für alle industriellen Anwendungen aus.
Für viele Anwendungen stehen bereits technisch umsetzbare Lösungen zur Verfügung. Herausforderungen bestehen insbesondere dort, wo hohe Temperaturen, große Durchsätze und hohe Leistungsanforderungen mit hohen Anforderungen an Prozessstabilität und Produktqualität zusammenkommen. Für diese Anwendungen stehen bislang nur begrenzt breit skalierbare elektrische Lösungen zur Verfügung, sodass weiterer Entwicklungs-, Erprobungs- und Anpassungsbedarf besteht.

2

Brennstoffwechsel: Ergänzende Option mit eigenen Unsicherheiten.
Der Einsatz biogener Brennstoffe, Biomethan oder perspektivisch Wasserstoff kann insbesondere dort eine wichtige Ergänzung sein, wo eine vollständige Elektrifizierung kurz- bis mittelfristig nicht realisierbar oder nicht optimal erscheint. Gleichzeitig bestehen Unsicherheiten hinsichtlich Verfügbarkeit, Energieträgerkosten, Infrastruktur, Nachhaltigkeitsanforderungen und regulatorischer Einordnung. Energieträgerwechsel und hybride Konzepte können Transformationsrisiken reduzieren, Flexibilität erhöhen und zusätzliche Resilienz schaffen, kompensieren jedoch nicht die Notwendigkeit klarer Rahmenbedingungen.

3

Wirtschaftlichkeit: Technische Verfügbarkeit ersetzt keinen Business Case.
Viele grundsätzlich verfügbare Maßnahmen werden nicht umgesetzt, weil die wirtschaftlichen Voraussetzungen fehlen oder zu unsicher sind. Hohe Strom- und Netzentgelte, hohe Umlagen und unzureichende Entlastungen, volatile Energiepreise, kurze interne Amortisationsanforderungen, schwer bewertbare Flexibilitätserlöse sowie Zusatzinvestitionen für Infrastruktur und Peripherie erschweren Investitionsentscheidungen. Praxistaugliche Förderinstrumente und robuste Bewertungsmethoden können helfen, wirtschaftlich tragfähige Projekte schneller in die Umsetzung zu bringen.

4

Regulatorik & Politik müssen Planungssicherheit und Orientierung schaffen. Unklare oder sich wiederholt ändernde politische und regulatorische Rahmenbedingungen verzögern Investitionen. Aktuell relevant sind beispielsweise offene Fragen zu Strompreisen und Stromnetzentgelten, Wasserstoff- und Batteriespeicherregulierung, CO_2-Preissignalen, Biomasseeinsatz sowie Planungs- und Genehmigungsverfahren. Unternehmen benötigen verlässliche, verständliche und langfristig belastbare Leitplanken, um Transformationsmaßnahmen strategisch planen und intern begründen zu können.

5

Die konkrete Umsetzung ist immer an standortspezifische Bedingungen gekoppelt – oft müssen dazu auch interne Hürden überwunden werden. Auch technisch und wirtschaftlich sinnvolle Maßnahmen können an praktischen Bedingungen vor Ort scheitern. Historisch gewachsene Anlagenstrukturen, begrenzte Flächen, bereits geplante Revisionszyklen, fehlende Netzanschlusskapazitäten, personelle Engpässe und Akzeptanzfragen beeinflussen die Realisierbarkeit erheblich. Deshalb braucht es standortspezifische Transformationspfade, frühzeitige Abstimmung mit Netzbetreibern und lokalen Akteuren sowie interne Entscheidungsgrundlagen, die technische, wirtschaftliche und organisatorische Anforderungen gemeinsam berücksichtigen. Zusätzlich stärkt interner Wissensaufbau sowie die Offenheit für neue Methoden, Bewertungsansätze und Kooperationsformen die Umsetzungsfähigkeit.

QUERSCHNITTSFORMAT ÜBERTRAGUNGS- UND VERTEILNETZ



1 Zentrale Hemmnisse überwinden – eine zukunftsfähige Industrie ermöglichen

Die Umsetzung von Maßnahmen zur CO_2-Verminderung ist Voraussetzung einer nachhaltigen Industrie, hängt jedoch von der technischen Verfügbarkeit und den Anforderungen zur Wirtschaftlichkeit ab. Hinzu kommen praktische Hürden, die in der übergeordneten Betrachtung häufig vernachlässigt werden. Im Sinne einer resilienten, zukunftsfähigen Industrie arbeitet das Kooperationsforum Industrie diese Hemmnisse heraus und zeigt Lösungsoptionen auf.

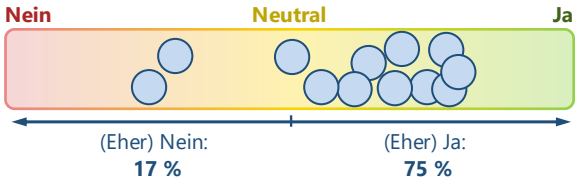
Die Elektrifizierung der Industrie nimmt zu. Aus Kosten-, Effizienz- und/oder Klimaschutzgründen werden Produktionsprozesse von fossilen Brennstoffen auf hybride oder voll elektrifizierte Lösungen umgestellt. Ein Stimmungsbild im Kooperationsforum „Elektrifizierung der Industrie" zeigt, dass für viele Unternehmen bereits heute ausreichend Elektrifizierungstechnologien marktreif verfügbar sind (Abbildung 1-1, oben). Dennoch gibt es weiterhin Anwendungen, für die die technologische Reife elektrothermischer Erwärmungstechnologien (noch) nicht ausreicht, um z. B. Durchsätze, Temperaturniveaus oder gleichmäßige Wärmeverteilung zu gewährleisten, ohne Qualitätseinbußen zu riskieren. Keiner der Teilnehmenden stimmt daher einer ausreichenden Verfügbarkeit von Elektrifizierungstechnologien uneingeschränkt zu. **Aus Industriesicht besteht weiterhin der Bedarf, technische Lücken und Anwendungsbereiche ohne verfügbare Elektrifizierungstechnologien aufzuzeigen und zu erschließen.**

Im Übergang von der technischen Verfügbarkeit zur Umsetzung zeigt sich ein heterogenes Bild (Abbildung 1-1, unten). Unternehmen, die zuvor die technische Verfügbarkeit von Elektrifizierungsmaßnahmen bejahten, setzen diese aktuell zum Teil (noch) nicht um. **Es gilt, die zugrunde liegenden Hemmnisse zu identifizieren, um Lösungsoptionen für eine stärkere Umsetzung aufzuzeigen.**

Elektrifizierung als Baustein einer zukunfts- und wettbewerbsfähigen Industrie

Elektrifizierung von Prozessen und der Bereitstellung von Prozesswärme ist von zunehmender Bedeutung im Sinne der Treibhausgasverminderung. Für eine flächendeckende Umsetzung muss jedoch **technische und wirtschaftliche Machbarkeit** gegeben sein.

These: Es stehen ausreichend marktreife Technologien zur Elektrifizierung unserer Prozesse & Prozesswärme - bereitstellung zur Verfügung.



These: Wir setzen aktuell Elektrifizierungsmaßnahmen um.

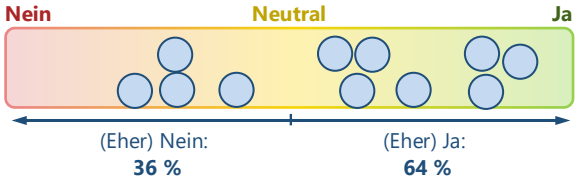


Abbildung 1-1: Stimmungsbilder aus dem Kooperationsforum Industrie zu Verfügbarkeit (oben) und Umsetzung (unten) von Elektrifizierungstechnologien.

Brennstoffwechsel als Alternative?

Neben Elektrifizierung kann der Wechsel hin zu (bilanziell) emissionsfreien Energieträgern wie biogenen Brennstoffen oder Wasserstoff eine Alternative bieten. Zu den technischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen kommen hierbei zusätzliche Unsicherheiten in Bezug auf **Verfügbarkeit, regulatorische Anforderungen und Preisentwicklungen** hinzu.

Weitere Hürden bei der Umsetzung in der Praxis

Neben technologischer Reife und Wirtschaftlichkeit entscheiden weitere Faktoren über die Maßnahmenumsetzung. Dazu zählen u. a. regulatorische Unsicherheiten, lange Genehmigungsprozesse, knappe Netzanschlusskapazitäten, Flächenverfügbarkeit sowie unternehmensinterne Strukturen, Prozesse und personelle Ressourcen. Sie sind häufig ein blinder Fleck in Transformationsstrategien. Für eine beschleunigte Umsetzung müssen sie stärker in den Fokus gesetzt werden.

Im **Kooperationsforum Industrie** kommen Unternehmen aus verschiedenen Branchen zusammen, um voneinander zu lernen und lösungsorientierte Ansätze zu entwickeln. Die identifizierten und beschriebenen Hemmnisse stehen exemplarisch für Herausforderungen der Industrie, erheben jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2 Technische Lücken: Wo Elektrifizierung alleine (noch) nicht ausreicht

Elektrifizierungstechnologien bieten in der Regel hohe Wirkungsgrade, vermeiden direkte Emissionen und haben häufig die Möglichkeit, durch leichte Regelbarkeit Flexibilisierung zu ermöglichen. Steigende Elektrifizierungsanteile in der Industrie dürfen jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass für ausgewählte Anwendungsfälle bisher keine bzw. nicht ausreichend marktreife Technologien zur Elektrifizierung bereitstehen. Für diese Anwendungen besteht weiterer Forschungs-, Entwicklungs- und Erprobungsbedarf.

Die ersten Handlungsfelder des Kooperationsforums Industrie beschäftigen sich mit Elektrifizierungstechnologien und dem Energieträgerwechsel in der Praxis. Zentral ist dabei die praktische Unternehmensperspektive. Im Folgenden werden daher technische Lücken der Transformation in den Bereichen Elektrifizierung und Brennstoffwechsel identifiziert und diskutiert. Ein Überblick über die vorhandenen Lösungsoptionen schafft die Grundlage, um anschließend die im Kooperationsforum Industrie aufgedeckten Technologielücken aus Sicht der Teilnehmenden aufzuzeigen.

2.1 Elektrifizierung als Lösung für viele industrielle Anwendungen

Für viele Temperaturbereiche industrieller Prozesswärme stehen heute elektrothermische Lösungen zur Verfügung. Der Fokus im Diskussionspapier liegt dabei auf allgemein nutzbaren Technologien zur elektrischen Wärmebereitstellung, während stark branchen- oder prozessspezifische Sonderlösungen hier bewusst nicht im Detail betrachtet werden.

Die Übersicht (Abbildung 2-1) erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern dient der strukturierten Einordnung verfügbarer Optionen und der Identifikation verbleibender, technischer Lücken. Wie dargestellt, lassen sich elektrothermische Erwärmungsverfahren entlang ihrer Rolle im industriellen Einsatz in drei Ebenen gliedern: Die **Versorgungsebene,** die **Prozessebene** sowie **Spezial-/Schlüsselprozesse.**

Ausführlichere Analysen von Technologien zur Elektrifizierung von Prozesswärme, inklusive in einzelnen Branchen, können [2] und [3] entnommen werden.

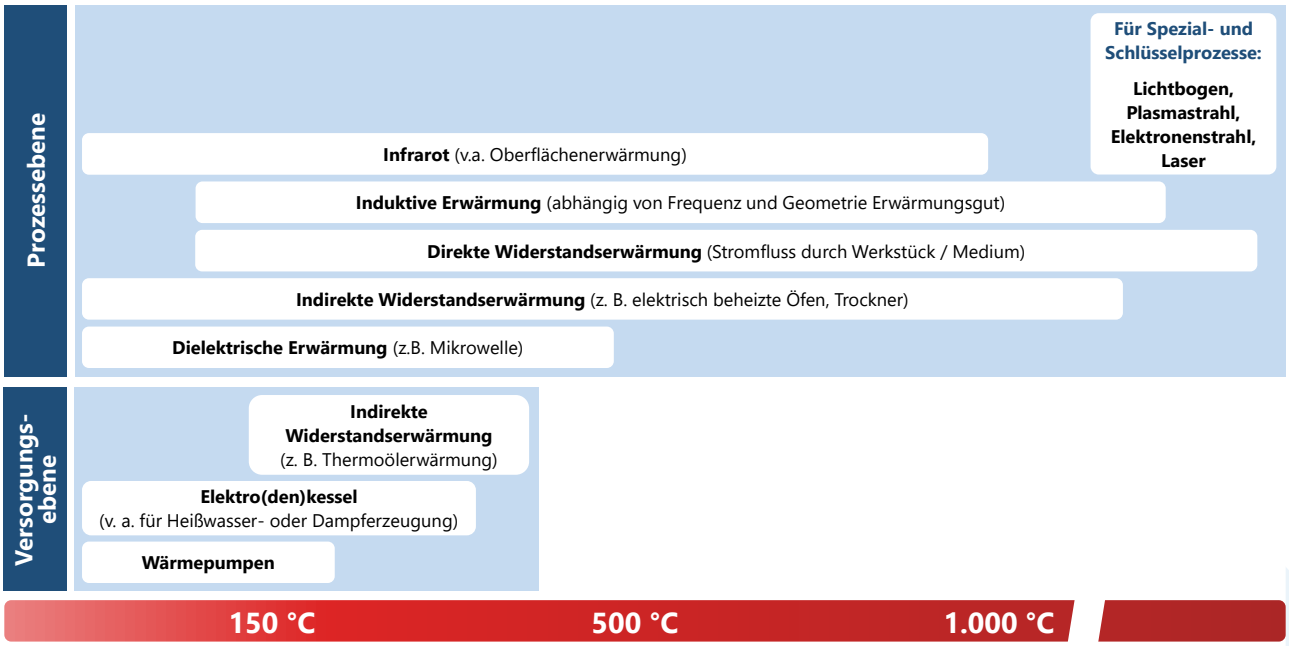


Abbildung 2-1: Einordnung elektrothermischer Erwärmungsverfahren nach typischem Einsatztemperaturbereich und Anwendungsnähe. Temperaturbereiche sind indikativ und stark prozessabhängig, in Anlehnung an [1]

I. Versorgungsebene: Geprägt durch indirekte elektrische Wärmebereitstellung
Auf Versorgungsebene sind Technologien verortet, bei denen elektrische Energie zunächst in einem Heizelement oder Wärmeträgermedium in Wärme umgewandelt und anschließend indirekt an Prozesse abgegeben wird. Diese, auf **indirekter oder direkter Widerstanderwärmung** basierenden Lösungen (z. B. Elektrokessel, Untertischboiler, Durchlauferhitzer etc.) oder **Stromdirektheizungen** können sowohl zentral als auch dezentral zum Einsatz kommen.

Insbesondere **Elektrokessel** (für kleinere Leistungsbereiche bis ca. 6 MW_{el}) und **Elektrodenkessel** finden zur elektrischen Dampferzeugung Anwendung. Letztere weisen bisher einen Leistungsbereich von 50 kW bis zu 60 MW_{el} auf [3]. Typische Wirkungsgrade liegen bei 99 %. Moderne Elektrodenkessel können Dampfdrücke von bis zu etwa 85 bar und entsprechende Sattdampftemperaturen von über 300 °C bereitstellen. Damit erreichen sie mittlere bis obere Druckniveaus industrieller Anwendungen, bleiben jedoch unterhalb der in Teilen weiterhin vorhandenen Hochdruck-Dampfsysteme (> 100 bar) in integrierten Industrieparks. [4] In Kombination mit Elektrodendurchlauferhitzern lassen sich Dampfvolumenströme bis 100 t/h bei 85 bar erzeugen [2].

Zunehmend kommen **Wärmepumpen** zum Einsatz, die in Abhängigkeit vom benötigten Temperaturhub zwischen Wärmequelle und -senke Effizienzvorteile mit sich bringen:

- **Wärmepumpen** mit Heizleistungen von mehr als 2 MW sind kommerziell verfügbar und decken Vorlauftemperaturen von bis zu ca. 80 °C ab. [2]
- **Hochtemperaturwärmepumpen** für den Temperaturbereich bis ca. 200 °C sind inzwischen ebenfalls am Markt verfügbar und decken größere Leistungsklassen bis zu 100 MW ab. [5] [6]

Diese Technologien sind technologisch ausgereift, breit verfügbar und eignen sich insbesondere für die Bereitstellung von Nieder- und Mitteltemperaturwärme, etwa zur Heißwasser- oder Dampferzeugung. Abbildung 2-1 zeigt, dass ihr Einsatzschwerpunkt typischerweise unterhalb von etwa 300 °C liegt.

II. Prozessebene: Prozessnahe Elektrifizierung für höhere Temperaturniveaus
Die Prozessebene umfasst elektrothermische Verfahren, bei denen die elektrische Energie zum einen direkt im Werkstück, Materialstrom oder Prozessraum in Wärme umgewandelt wird. Typische Vertreter sind die **direkte Widerstandserwärmung**, die **induktive Erwärmung** sowie materialabhängige, **dielektrische Verfahren** (z. B. Mikrowellenerwärmung). Zum anderen kommt auf Prozessebene oftmals auch die **indirekte Widerstandserwärmung**, z. B. in Öfen oder Trocknern, zum Einsatz, wodurch die Wärme über einen Heizleiter an ein Arbeitsmedium übertragen und konvektiv an das Erwärmungsgut abgegeben wird. Die **Infraroterwärmung** findet ebenfalls Anwendung, insbesondere für oberflächen- oder zonenspezifische Erwärmung.

III. Spezial- und Schlüsselprozesse: Sehr hohe Temperaturen, begrenzte Skalierung
Die dritte Ebene umfasst Spezial- und Schlüsselprozesse mit sehr hohen Temperaturen und Leistungsdichten, darunter **Lichtbogen-, Plasmastrahl-, Elektronenstrahl-** und **Lasererwärmung.** Diese Technologien erlauben Temperaturen deutlich oberhalb von 1.000 °C und sind in einzelnen Branchen, beispielsweise der Metallurgie, Stand der Technik.

Fazit: Technische Lücken verbleiben trotz breit verfügbaren Elektrifizierungstechnologien
Über alle Ebenen hinweg zeigen sich die zentralen technischen Herausforderungen der Elektrifizierung nicht primär in der grundsätzlich erreichbaren Temperatur, sondern in der **Kombination aus Temperaturniveau & -profil, Durchsatzanforderungen und industrieller Integration.**

Auf der **Versorgungsebene** sind elektrische Lösungen zur Wärme- und Dampferzeugung grundsätzlich technisch verfügbar. Mit steigenden Temperaturniveaus erfordern Wärmepumpen jedoch zunehmend spezialisierte Hochtemperaturkonzepte und teilweise individuelle Sonderbauformen. Bei der Dampferzeugung mittels Elektrodenkesseln bestehen die wesentlichen Herausforderungen in hohen Druck- und Dampfmengenanforderungen, den erforderlichen Netzanschlussleistungen sowie der Integration in bestehende Versorgungsinfrastrukturen.

Auf der **Prozessebene** ermöglichen elektrothermische Verfahren eine effiziente und gezielte Energieeinbringung. Ihre Anwendbarkeit ist jedoch deutlich stärker von Materialeigenschaften, Geometrie und Prozessführung abhängig und damit weniger universell.

Spezial- und Schlüsselprozesse wiederum erlauben sehr hohe Temperaturen und Leistungsdichten, sind jedoch stark materialspezifisch, häufig diskontinuierlich und mit hohen Anforderungen an elektrische Infrastruktur und Anlagenintegration verbunden. Die zentrale technologische Lücke liegt weniger in der Erreichbarkeit hoher Temperaturen als in der Elektrifizierung kontinuierlicher Hochdurchsatz-Feststoffprozesse mit intensiver Stoffumwandlung und komplexer Wärme-

und Stoffkopplung, wie sie insbesondere in Drehrohrofen- und Schachtprozessen oberhalb von etwa 500 °C auftreten. Hier existieren bisher nur begrenzt industrielle, rein elektrische Lösungen ohne grundlegende Prozessneugestaltung.

Aus Sicht der Teilnehmenden im Kooperationsforum Industrie stehen heute für viele Anwendungsfälle der industriellen Prozesswärme grundsätzlich Elektrifizierungstechnologien zur Verfügung.

Die größten **technologischen Lücken** bestehen jedoch bei **kontinuierlichen Hochtemperatur- und Hochdurchsatzprozessen**, insbesondere bei Prozessöfen, Verbrennungs- und Abgasbehandlungsanlagen, sowie der Dampferzeugung bei hohen Drücken (> 100 bar) und Durchsätzen.

In zahlreichen weiteren Anwendungsfällen sind technische Lösungen zwar verfügbar, deren Umsetzung scheitert jedoch aktuell an der **fehlenden Wirtschaftlichkeit**, insbesondere infolge hoher Strompreise und -netzentgelte, geringer Vollaststunden sowie begrenzter Netzanschlusskapazitäten.

Tatsächlich umgesetzt werden vor allem **prozessnahe, modulare und gut integrierbare Maßnahmen**, beispielsweise elektrische Trocknungs- und Erwärmungsprozesse, Wärmepumpenanwendungen zur Abwärmenutzung, die Elektrifizierung von Hilfs- und Nebenaggregaten sowie hybride Wärmeversorgungskonzepte. Diese Anwendungen zeichnen sich häufig durch eine vergleichsweise einfache Integration in bestehende Anlagenstrukturen und überschaubare Anforderungen an die Prozessanpassung aus.

2.2 Energieträgerwechsel als Alternative?

Aufbauend auf den dargestellten Grenzen der Elektrifizierung betrachtet der folgende Abschnitt **Energieträgerwechsel** und **hybride Prozesskonzepte** als ergänzende Optionen, die es ermöglichen, industrielle Prozesse schrittweise zu transformieren und Emissionen auch dort zu reduzieren, wo eine vollständige Elektrifizierung aktuell noch nicht umsetzbar ist.

I. Versorgungsebene: Energieträgerwechsel in der zentralen Wärme- und Dampferzeugung
Auf der Versorgungsebene umfasst der Energieträgerwechsel vor allem den Ersatz fossiler Brennstoffe in zentralen Anlagen zur Wärme- und Dampferzeugung. Typische Einsatzfelder sind Dampf-, Heißwasser- und Thermoölsysteme, die bisher mit Erdgas, Heizöl oder Kohle betrieben werden.

Als **alternative Energieträger** kommen derzeit teilweise biogene Brennstoffe wie feste Biomasse zum Einsatz. In Einzelfällen und zukünftig gegebenenfalls stärker ausgeprägt sind auch Wasserstoff, wasserstoffangereicherte Brennstoffe, Biogas oder Biomethan denkbar. Allen Optionen gemeinsam ist, dass ihre zukünftige Verfügbarkeit sowie die erwarteten Energieträgerkosten aus Unternehmenssicht mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind und damit Investitionsentscheidungen erschweren. Der Einsatz erfolgt häufig durch die Anpassung bestehender Kessel- und Brennersysteme oder durch den parallelen Betrieb mehrerer Energieträger. Auf diese Weise lässt sich der fossile Brennstoffeinsatz reduzieren, ohne die grundsätzliche Struktur der Wärmeversorgung zu verändern.

Der Energieträgerwechsel auf der Versorgungsebene ist besonders dort relevant, wo hohe Versorgungssicherheit und Flexibilität gefordert sind und eine vollständige Elektrifizierung aufgrund begrenzter Netzanschlusskapazitäten, hoher elektrischer Leistungsbedarfe oder betrieblicher Resilienzanforderungen derzeit nicht als optimale Lösung bewertet wird.

II. Prozessebene: Energieträgerwechsel in prozessnahen thermischen Anwendungen
Auf der Prozessebene betrifft der Energieträgerwechsel eingesetzte Brennstoffe, die in direktbefeuerten Produktions- und Prozessanlagen, wie z. B. in Prozessöfen, Reaktoren, Trocknungs- und Verdampfungsprozessen, zum Einsatz kommen. Hier ist nicht die zentrale Wärmebereitstellung, sondern die gezielte Energieeinbringung in den Produktionsprozess im Vordergrund.

Der Wechsel des Energieträgers zielt darauf ab, fossile Brennstoffe durch erneuerbare oder CO_2-arme Alternativen zu ersetzen, die ähnliche thermische Eigenschaften besitzen. Anwendungen finden sich ebenfalls beispielsweise in der Nutzung von Biogas oder Biomethan in prozessintegrierten Feuerungen oder im perspektivischen Einsatz von Wasserstoff in Hochtemperaturprozessen.

Energieträgerwechsel auf der Prozessebene werden häufig schrittweise umgesetzt, etwa durch den Teilersatz von Erdgas oder durch energieträgerflexible bzw. hybride Brenner- und Ofenkonzepte, die durch Beimischung oder als Multi-Fuel-Brenner unterschiedliche Energieträger verarbeiten können. Dies erleichtert die Integration in bestehende Prozesse und ermöglicht eine Anpassung an sich verändernde Energiemärkte.

III. Spezial- und Schlüsselprozesse: Energieträgerwechsel bei Hochtemperatur- und Verbrennungsfunktionen

In Spezial- und Schlüsselprozessen spielt der Energieträgerwechsel eine Rolle insbesondere dort, wo sehr hohe Temperaturen, Verbrennungsfunktionen oder die Mitverwertung von Rest- und Abfallstoffen technisch notwendig sind. Beispiele sind die thermische Nachverbrennung bei der Abgasbehandlung, metallurgische Prozesse oder Hochtemperaturöfen in der Grundstoffindustrie.

Hier kommen **alternative Brennstoffe** wie biogene Reststoffe, Abfallbrennstoffe oder perspektivisch Wasserstoff zum Einsatz, um fossile Brennstoffe zumindest anteilig zu ersetzen. Der Energieträgerwechsel kann häufig auf bestehenden Anlagenstrukturen aufbauen, erfordert jedoch je nach Energieträger teilweise umfangreiche Anpassungen an Brennstoffbereitstellung, Feuerungstechnik, Infrastruktur und Sicherheitssystemen. Er ist zudem eng mit Fragen der Prozessstabilität, Produktqualität und Emissionskontrolle verknüpft.

In diesen Anwendungen ist der Energieträgerwechsel weniger eine fundamentale Prozessumstellung als vielmehr eine Anpassung der eingesetzten Brennstoffe, um Treibhausgasemissionen zu senken und regulatorische Anforderungen zu erfüllen.

Fazit: Energieträgerwechsel bringt ebenfalls Herausforderungen und Unsicherheiten mit sich

Die technischen Herausforderungen beim Energieträgerwechsel liegen weniger in der grundsätzlichen Funktionsfähigkeit der Prozesse, sondern in der **Eignung, Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Systemintegration** alternativer Brennstoffe.

- **Biogene Energieträger** wie Biomasse, Biogas oder Biomethan sind häufig durch begrenzte regionale Verfügbarkeit, konkurrierende Nutzungen und logistische Anforderungen eingeschränkt.
- **Wasserstoff** weist zwar hohe technische Einsatzmöglichkeiten auf, ist jedoch mit hohem Infrastrukturbedarf, Anpassungen bestehender Feuerungs- und Sicherheitssysteme sowie aktuell und mittelfristig hohen Kosten verbunden.

Darüber hinaus sind viele Prozesse **auf bestimmte Brennstoffeigenschaften** (z. B. Flammentemperatur, Strahlung, Reaktionskinetik) ausgelegt, sodass ein Brennstoffwechsel technische Anpassungen an Brennern, Brennkammern, Materialien und Prozessführung erfordert. In Spezial- und Hochtemperaturprozessen bleiben zudem Herausforderungen bei Prozessstabilität, Produktqualität und Emissionsverhalten bestehen. Insgesamt ist der Energieträgerwechsel technisch möglich, jedoch häufig stoff- und standortspezifisch begrenzt.

In Ergänzung zum kompletten Energieträgerwechsel liegen die technischen Herausforderungen der **Hybridisierung** primär in der Komplexität der Anlagen- und Betriebsführung. Die Kombination elektrischer und brennstoffbasierter Technologien erfordert abgestimmte Regel-, Steuer- und Sicherheitskonzepte, insbesondere bei schwankenden Lasten, unterschiedlichen Reaktionszeiten der Systeme sowie einem flexiblen Wechsel zwischen den Energieträgern in Abhängigkeit von Kosten-, Verfügbarkeits- und Betriebsanforderungen. Diese hybriden Anlagen führen häufig zu Doppelstrukturen bei Erzeugung, Infrastruktur und Wartung, was zusätzliche technische Schnittstellen und erhöhte Anforderungen an Verfügbarkeit und Redundanz mit sich bringt. Darüber hinaus bleiben zentrale Engpässe, etwa bei Netzanschlusskapazitäten, Leistungsanforderungen und Hochdurchsatzprozessen, auch in hybriden Konzepten bestehen.

Aus Sicht der Teilnehmenden wird der Energieträgerwechsel derzeit als wichtiger Hebel im Transformationsprozess wahrgenommen, insbesondere für Anwendungen, in denen eine vollständige Elektrifizierung kurz- bis mittelfristig nicht realisierbar ist.

Der Einsatz biogener Brennstoffe, Biomethan oder perspektivisch Wasserstoff würde es ermöglichen, **bestehende thermische Prozesse weiterzuführen und zugleich Emissionen zu reduzieren**, ohne grundlegende Eingriffe in Anlagenstruktur und Prozessdesign vorzunehmen.

Gleichzeitig überwiegt in den Diskussionen eine vorsichtige, schrittweise Herangehensweise: Neben Elektrifizierungstechnologien hängt ein Energieträgerwechsel maßgeblich von Verfügbarkeit, Kostenentwicklung und **regulatorischer Klarheit** der alternativen Energieträger ab.

Hybridisierte Konzepte ergänzen diesen Ansatz aus Teilnehmersicht vor allem als **operatives Instrument**, um Abhängigkeiten zu reduzieren, Flexibilität zu erhöhen und Transformationsrisiken abzufedern. Als Alternative zu einer vollständigen Elektrifizierung bzw. Brennstoffumstellung bieten hybride / bivalente Systeme **Resilienzpotenziale** und zusätzliche Handlungsoptionen hinsichtlich Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Betriebsführung.

Energieträgerwechsel und Hybridisierung können aus Sicht der Industrie dazu beitragen, Transformation handhabbar zu machen. Gleichzeitig wird Hybridisierung nicht nur als Übergangslösung verstanden: Durch den flexiblen Einsatz unterschiedlicher Energieträger können Unternehmen auf veränderte Markt-, Preis- und Versorgungssituationen reagieren und industrielle Flexibilität bereitstellen. Eine vollständige Konzentration auf einen einzelnen Energieträger würde diese Handlungsoptionen teilweise einschränken.

3 Wirtschaftliche Lücken: Technisch verfügbar, aber der Business Case fehlt

Die Möglichkeit eines wirtschaftlichen Einsatzes ist entscheidend für die Umsetzung und den Hochlauf von Elektrifizierungstechnologien in der Praxis. Die entsprechenden Bewertungen müssen immer anhand konkreter, standortspezifischer Rahmenbedingungen getroffen werden. Für robuste Bewertungen sind die notwendigen Instrumente, wie z. B. Kapitalwertberechnungen, Sensitivitätsanalysen, Nutzung von Preiszeitreihen und Berücksichtigung von Erlöspotenzialen von Vorteil. Diese erfordern jedoch einen entsprechenden internen Wissensaufbau und Akzeptanz für diese Methodik.

Wie das vorhergehende Kapitel zeigt, verbleiben einige Anwendungen, für die ideale technische Lösungen zur Elektrifizierung (noch) nicht vorhanden sind. Ein Großteil industrieller Anwendungsfälle kann jedoch bereits heute schon elektrifiziert werden. **Dennoch scheitern Umsetzungsvorhaben häufig an Anforderungen zur Wirtschaftlichkeit.**

Für robuste Bewertungen der Wirtschaftlichkeit empfehlen sich auf der Kapitalwertmethode basierende Verfahren, wie beispielsweise in der VALERI-Norm vorgegeben.[1] Diese kann durch Sensitivitäts- bzw. Szenarioanalysen (Variation einer oder mehrerer Rahmenparameter) erweitert werden. Dazu empfiehlt sich die Nutzung von Zeitreihen zur Abbildung der Entwicklung verschiedener Energieträger und CO_2-Preise, wie es ein Großteil der Unternehmen im Kooperationsforum bereits macht (Abbildung 3-1, oben).

Bei der Inanspruchnahme von Fördermöglichkeiten zur Umsetzung von Elektrifizierungsmaßnahmen (Abbildung 3-1, mittig) zeigt sich ein heterogenes Bild: Nahezu die Hälfte der Unternehmen hat kürzlich Fördermaßnahmen beantragt, während die andere Hälfte der Unternehmen keine Förderungen nutzte. Große Einigkeit gibt es jedoch dabei, dass Fördermaßnahmen erweitert bzw. praxistauglicher ausgestaltet werden sollten (Abbildung 3-1, unten).

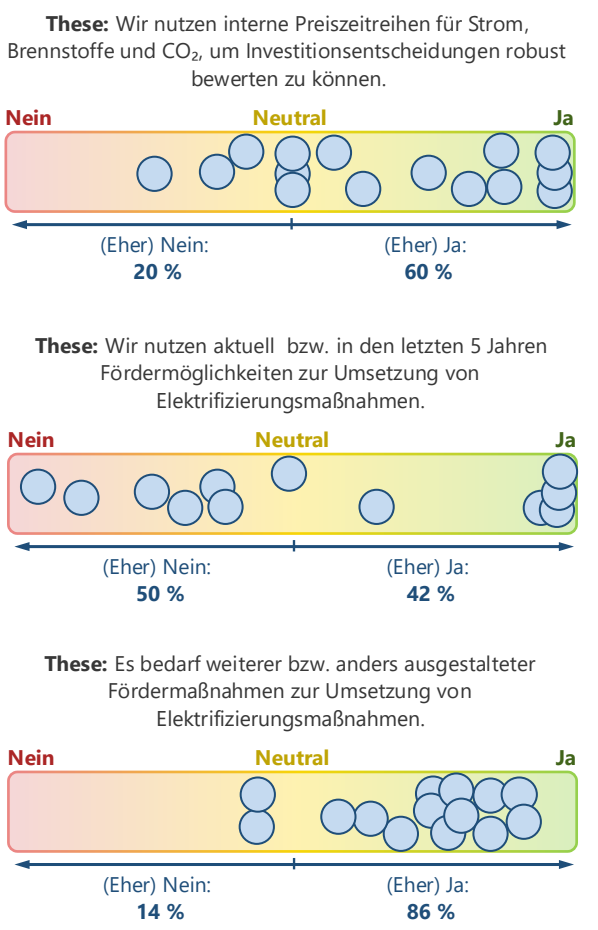


Abbildung 3-1: Stimmungsbilder aus dem Kooperationsforum Industrie zur Nutzung von Preiszeitreihen (oben), der Inanspruchnahme von Förderinstrumenten (mittig) bzw. der Ausgestaltung von Fördermaßnahmen (unten).

[1] Frei verfügbares Excel-Tool und weitere Infos zur VALERI-Norm: https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/info-excel-tool-was-ist-die-valeri-normdin-en-17463/

Pauschale Aussagen zur Wirtschaftlichkeit immer standortspezifisch validieren
Bei Aussagen zur Wirtschaftlichkeit einzelner Technologien ist zu beachten, dass finale Einschätzungen nur standortspezifisch getroffen werden können. Die konkreten Business Cases werden von den unterschiedlichen Bedingungen vor Ort beeinflusst, insbesondere:

- **Umfang der notwendigen, begleitenden Investitionsmaßnahmen:** z. B. Kosten für Peripherie, Integration in die interne Infrastruktur, …
- **Begleitende lokale Aspekte:** wie z. B. Grundstücksverfügbarkeiten, Zustand und Leistungsfähigkeit der vorgelagerten Infrastruktur, …

Die folgenden ökonomischen/wirtschaftlichen Hemmnisse (Abbildung 3-2) wurden im Kooperationsforum als besonders relevant identifiziert:

- **Interne Wirtschaftlichkeitsvorgaben** erfordern häufig kurze Amortisationszeiten. Dadurch werden Investitionen in Effizienzmaßnahmen, aber auch größere Elektrifizierungsvorhaben häufig nicht getätigt. Dies gilt selbst dann, wenn sie langfristig Kostenvorteile oder strategischen Nutzen bieten würden. Kapitalwertbasierten Methoden zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit stellen im Gegensatz zur Risikobewertung eine ganzheitliche finanzielle Bewertung über die gesamte Lebensdauer einer Investition dar. Sie können somit als Argumentationsgrundlage für die interne Genehmigung von Investitionen dienen.
- **Feste (Re-)Investitionszyklen** geben in der Regel vor, wann in neue Technologien und Anlagen investiert wird. Noch nicht abgeschriebene Anlagen verursachen somit einen Lock-In bis zum nächsten Investitionszyklus.
- Die Wirtschaftlichkeit von Technologien kann stark **vom konkreten Anwendungsfall abhängen**. So kann z. B. die Dampferzeugung mittels Wärmepumpe und hohen Volllaststunden bereits heute wirtschaftlich sein. Kommt diese jedoch nur saisonal im Winterhalbjahr zum Einsatz, nimmt die Wirtschaftlichkeit des Business Cases ab.

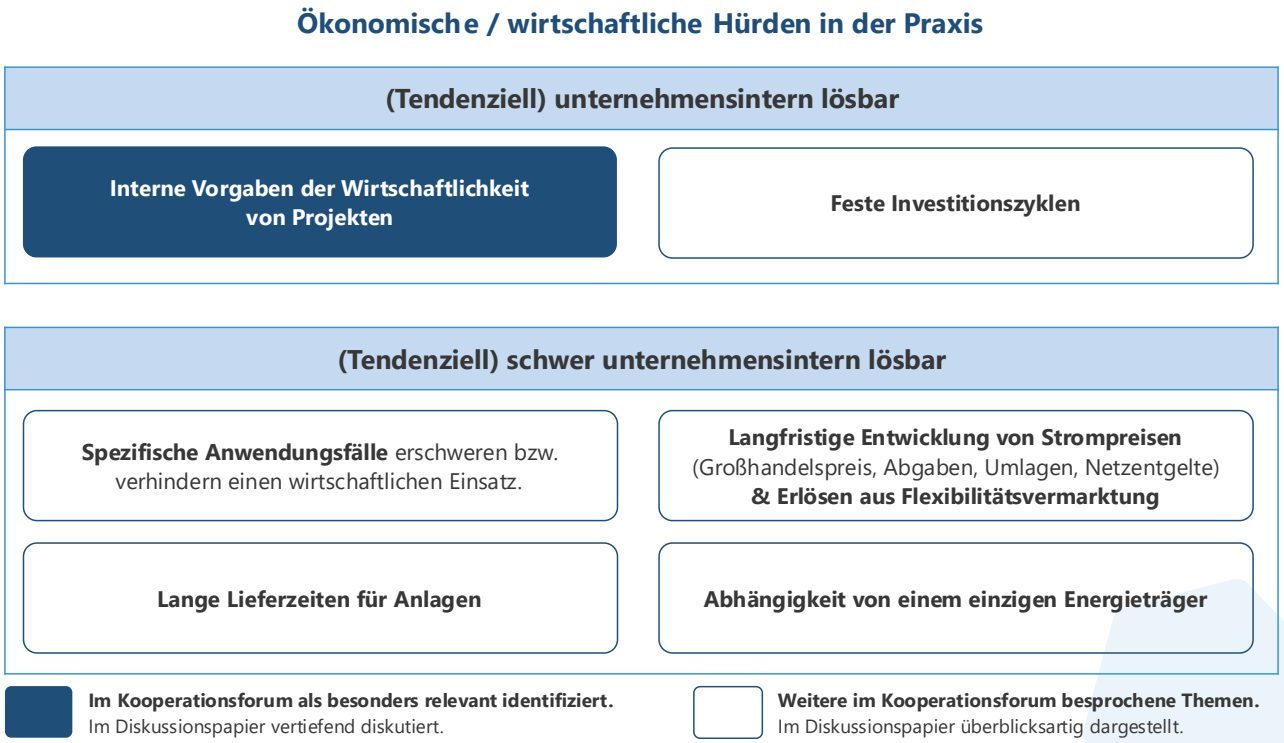


Abbildung 3-2: Ökonomische & wirtschaftliche Hürden bei der Umsetzung von Investitionsmaßnahmen in der Industrie.

- Die **unsichere Entwicklung der Energieträgerpreise** mit **hoher Marktvolatilität** erhöhen Planungsrisiken. Sie erfordern einen neuen Umgang in der Wirtschaftlichkeitsrechnung. Dazu zählen nicht nur die volatileren Strompreise im Großhandel, sondern auch Kostenbestandteile wie Netzentgelte und Umlagen/Abgaben. Potenzielle **Zusatzerlöse aus der Flexibilitätsvermarktung** müssen zunächst technisch ermöglicht werden, bspw. durch flexible Produktion oder Anlagenparks. Ohne internen Wissensaufbau sind sie häufig schwer quantifizierbar. Somit fließen theoretisch mögliche Erlöspotenziale nur eingeschränkt in Investitionsentscheidungen ein. Die Bereitschaft, externe Vermarkter einzubinden, ist unterschiedlich ausgeprägt.
- Neben der finanziellen Bewertung stellen **lange Lieferzeiten für Anlagen** (-komponenten) eine zusätzliche ökonomische Unwägbarkeit dar. Sie erschweren eine verlässliche Projektplanung und erhöhen das Risiko von Kostensteigerungen oder Verzögerungen, insbesondere bei Projekten mit engem Zeitrahmen oder externen Abhängigkeiten.
- Die **Abhängigkeit von Strom als einzigem Energieträger** (bei kompletter Elektrifizierung) führt zur Abhängigkeit von der Preisentwicklung am Strommarkt. Zur Absicherung sind Investitionen in Stromspeicher (und ggf. Erweiterungen der Netzanschlusskapazitäten) notwendig. Daher bevorzugen einige Unternehmen aus Resilienzgründen hybride (Gas/Strom-) Technologien.

4 Von der Theorie in die Praxis: Woran gute Konzepte scheitern

Auch technisch verfügbare Maßnahmen, die prinzipiell wirtschaftlich sein können, werden nicht immer umgesetzt. Grund dafür sind praktische „Alltagshemmnisse". Diese finden in übergeordneten Zielsetzungen und Zeitplänen häufig keine Berücksichtigung, können jedoch die Maßnahmenumsetzung ausbremsen.

Das Stimmungsbild der Unternehmen im Kooperationsforum Industrie ist eindeutig: Für die überwiegende Mehrheit spielen neben der technisch-wirtschaftlichen Verfügbarkeit von Maßnahmen weitere Faktoren und Rahmenbedingungen eine entscheidende Rolle bei der Entscheidung für oder gegen eine Umsetzung (Abbildung 4-1, oben).

Die Erfahrungen im Kooperationsforum Industrie zeigen, dass insbesondere **politisch-regulatorische** sowie **technisch bzw. technologische Hürden** bestehen, die im Folgenden daher hervorgehoben betrachtet werden. Hinzu kommen weitere **ökonomische bzw. wirtschaftliche, sozial und organisationsbezogene sowie ökologische Hürden.** Die folgenden Kapitel zeigen die genannten Hemmnisse auf.

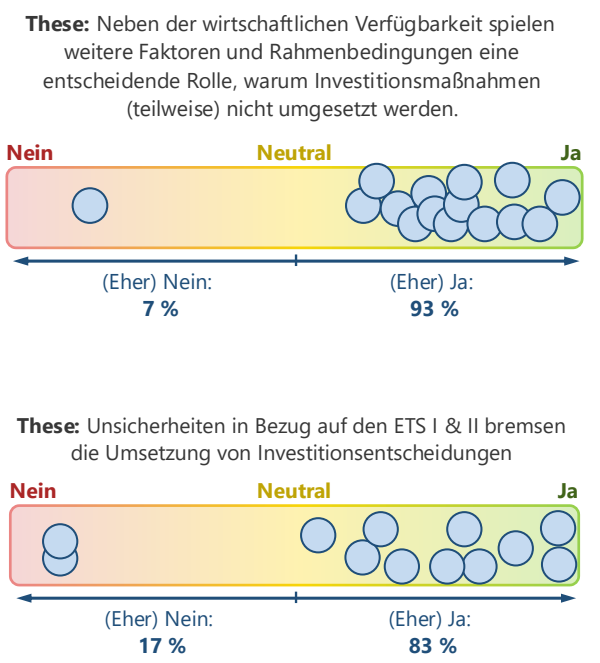


Abbildung 4-1: Stimmungsbilder aus dem Kooperationsforum Industrie zu hemmenden Rahmenbedingungen (oben) und Unsicherheiten in Bezug auf den ETS (unten).

Forderungen aus Sicht der Industrie:

I – Verlässliche und klare Rahmenbedingungen

Für Planungssicherheit sind langfristig verlässliche Leitlinien, sowohl in der strategischen Zielsetzung als auch in der Ausgestaltung der regulatorischen Rahmenbedingungen wie beispielsweise des ETS auf EU-Ebene oder des AgNes-Prozesses auf Bundesebene relevant. Korrekturen bei zuvor vorgegebenen Zielen sind möglich. Um jedoch Vertrauen in politische Strategien und Zielvorgaben zu stärken, sind größere wiederholte Richtungsänderungen zu vermeiden. So können Unsicherheiten und Zurückhaltung bei Investitionen abgebaut werden.

II – Verständliche, effiziente und praktikable Regulierungen

Neben der verlässlichen Ausgestaltung von Rahmenbedingungen ist ebenfalls wichtig, diese „einfach" zu halten, um sowohl personelle als auch finanzielle Ressourcen in den Unternehmen für tatsächliche Transformationsaufgaben freizuhalten.

III – Vorausschauender, koordinierter Infrastrukturausbau als Standortfaktor

Sowohl die Elektrifizierung und der Wasserstoffhochlauf, aber auch externe Abwärmeauskopplung oder der Aufbau von Speicherkapazitäten hängen maßgeblich von vorgelagerten Infrastrukturen ab. Regionale Netz- und Infrastrukturdialoge zwischen Unternehmen, Netzbetreibern, Kommunen und weiteren Akteuren können helfen, Bedarfe frühzeitig sichtbar zu machen und Ausbaupfade besser abzustimmen. Ein proaktiver Infrastrukturausbau wirkt zunehmend als Standortfaktor und ermöglicht Transformationsinvestitionen.

4.1 Politisch & regulatorisch: Offene Fragen und mangelnde strategische Kontinuität

Alle politisch-regulatorischen Hürden teilen die Gemeinsamkeit, dass sie **schwer bis gar nicht durch die Unternehmen selbst zu lösen sind** (Abbildung 4-2). Aus Industrieperspektive führen besonders drei Schwerpunkte zu Investitionsverzögerungen:

I. Keine Verlässlichkeit bei regulatorischen Rahmenbedingungen

Allgemein **unsichere Rahmenbedingungen** durch laufende regulatorische Anpassungen und fehlende strategische Kontinuität verhindern eine belastbare Planungssicherheit. Insbesondere fehlen verlässliche, Legislatur- und parteiübergreifende Zielbilder, die langfristig feststehen und Orientierung bieten. Konkret äußert sich dies beispielsweise in den Unsicherheiten um die Entwicklung des ETS I/II, der als Preissignal signifikanten Einfluss auf Investitionsentscheidungen hat. Die zum einen schwer vorhersagbare Preisentwicklung, aber auch Diskussionen um eine mögliche Aufweichung des Instruments in der aktuellen Revisionsphase verzögern Investitionsentscheidungen und können auch den Business Case bereits getroffener Investitionsentscheidungen negativ beeinflussen. Ähnlich verhält es sich mit der Festlegung der neuen allgemeinen Netzentgelte (Grundmodell) und Sondernetzentgelte im AgNes-Prozess. Die darin festzulegenden Rahmenbedingungen beeinflussen direkt die Wirtschaftlichkeit von Elektrifizierungsmaßnahmen.

Investitionsentscheidungen werden erleichtert, wenn politische und regulatorische Rahmenbedingungen langfristig verlässlich und konsistent ausgestaltet sind. Dabei kommt sowohl der zeitnahen und rechtssicheren Klärung offener Festlegungsverfahren als auch der Stabilität bestehender Leitlinien und Instrumente eine zentrale Bedeutung für die Planungssicherheit zu. Bereits bestehende Leitlinien und Instrumente sollten dahingehend gestärkt und nicht in Frage gestellt werden.

II. Fehlende Regelung für H_2-Verteilnetzentgelte

Die **Verteilnetzentgelte für Wasserstoff** sind aktuell noch nicht geregelt. Neben der physischen Erschließung stellen sie damit den zweiten großen Unsicherheitsfaktor im Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft dar. Hinzu kommen Unsicherheiten, ob und wann (grüner) Wasserstoff ausreichend und wirtschaftlich verfügbar sein wird. Transformationsmaßnahmen, die auf Wasserstoff angewiesen sind, basieren derzeit häufig auf Erdgas. Verzögerungen in der Wasserstoffbereitstellung führen damit zu einem längeren Erdgasbezug, für welchen jedoch durch die zunehmend sinkende Abnehmerzahl im Verteilnetz mit einem starken Anstieg der Erdgasverteilnetzentgelte zu rechnen ist.

Politische & regulatorische Hürden in der Praxis

(Tendenziell) unternehmensintern lösbar

– – –

(Tendenziell) schwer unternehmensintern lösbar

Unsichere Rahmenbedingungen z. B. AgNes, ETS I/II, politische Ausrichtungen & Zielvorgaben, …	**H_2-Verteilnetze** Fehlende Regelung zu Erschließung und Netzentgelten im H_2-Verteilnetz	**Batteriespeichernetzentgelte** Unklare/uneinheitliche Regelungen, fehlende bundesweite Kostenwälzung
Planungs- / Genehmigungverfahren	**Unsicherheiten zu Herkunftsnachweisen bei Strompreiskompensation**	**Ungleichbehandlung bei Entlastungen für bestimmte Verbrauchergruppen**
Externe Abwärmenutzung in der Kommune	**Unklare strategische Bedeutung und regulatorische Anforderungen an Biomasse**	**Unklare Zukunft der Erdgasnetze (Verfügbarkeiten, Netzentgelte, Rolle für Biomethan)**

Im Kooperationsforum als besonders relevant identifiziert. Im Diskussionspapier vertiefend diskutiert.

Weitere im Kooperationsforum besprochene Themen. Im Diskussionspapier überblicksartig dargestellt.

Abbildung 4-2: Politische & regulatorische Hürden bei der Umsetzung von Investitionsmaßnahmen in der Industrie.

Um eine Abschätzung von zukünftigen Netzentgelten, sowohl für Wasserstoff als auch Erdgas zu ermöglichen, bedarf es aus Sicht der Industrie der Festlegung regulatorischer Rahmenbedingungen für die Verteilnetzentgelte. Gleichzeitig ist der zunehmende Ausstieg von Verbrauchern aus dem Erdgasnetz stärker in den (regulatorischen) Fokus zu setzen.

III. Offene Fragen zu Speichernetzentgelten

Auch **Batteriespeicher-/Einspeisenetzentgelte** sind derzeit durch unklare und unsichere Regelungen geprägt. Dies führt zu erheblichen Unsicherheiten für Investoren und Betreiber, da Netzanschlusskosten und laufende Entgelte kaum verlässlich kalkulierbar sind. Gleichzeitig werden systemdienliche Effekte von Batteriespeichern, wie beispielsweise Flexibilitätsbereitstellung, bislang nur unzureichend berücksichtigt. Die fehlende Harmonisierung hemmt damit den wirtschaftlichen Ausbau von Speichern und steht im Widerspruch zu ihrer zunehmend zentralen Rolle im zukünftigen Energiesystem – und auch für Industrieunternehmen – zum Ausgleich flexibler Erzeugung aus Erneuerbaren Energien.

Für eine Flexibilisierung des Strombezugs ziehen viele Unternehmen die Installation von Batteriespeichern in Betracht. Um Business Cases zuverlässiger berechnen zu können, ist eine klare und konsistente Klärung offener Fragen zu Batteriespeichernetzentgelten und Kostenwälzungen von zentraler Bedeutung.

Weitere politische & regulatorische Hemmnisse

Die weiteren genannten Praxishemmnisse werden hier nur oberflächlich angerissen, sind aber dennoch von Relevanz, um die Investitionsmaßnahmen in der Industrie zu beschleunigen.

- Relevante Bremser sind dabei unter anderem lange **Planungs- und Genehmigungsverfahren**, die sowohl in prozessualen als auch personellen Engpässen zu begründen sind. Diese sind sowohl durch Vereinfachung der Verfahren als auch Bereitstellung notwendiger (personeller) Ressourcen lösbar.
- Um Klarheit in den theoretisch verfügbaren Transformationsoptionen zu schaffen, ist außerdem die Rolle von **Biomasse** politisch zu klären. Dazu gehören insbesondere die regulatorischen Anforderungen, die beispielsweise an die Herkunft der Biomasse gestellt werden, damit diese als nachhaltig gewertet werden. Auch die strategische Bedeutung von Biomasse und ihre vorrangigen Einsatzgebiete (in Industrie und Energiewirtschaft) bzw. Anwendungen (thermische vs. stoffliche Nutzung) sind politisch zu klären.
- In der Ausgestaltung von Entlastungen ist auf eine **Gleichbehandlung unter den industriellen Verbrauchergruppen** zu achten. So ist beispielsweise die Rolle von Industriepark- und Industrienetzbetreibern zu beachten. Dort werden Energieversorgung, Netzinfrastruktur und industrielle Produktion standortweit und unternehmensübergreifend organisiert. Wenn Entlastungen, Privilegierungen oder regulatorische Anforderungen ausschließlich auf einzelne Letztverbraucher zugeschnitten sind, können solche Strukturen benachteiligt werden. Bei der Ausgestaltung neuer Regelungen sollte daher sichergestellt werden, dass Industrieparkbetreiber, Industrienetzstrukturen und angeschlossene Unternehmen sachgerecht berücksichtigt werden.

4.2 Technisch & technologisch: Marktreife allein führt nicht automatisch zur Umsetzung

Neben den beschriebenen technischen Lücken bzw. nicht ausreichend vorhandenen Technologien für bestimmte Anwendungsfälle bremsen weitere Hemmnisse in der Praxis die Umsetzung von Treibhausgasverminderungsmaßnahmen aus.

I. Fehlende Netzanschlusskapazitäten (Strom)
Technisch verfügbare und wirtschaftlich einsetzbare Elektrifizierungstechnologien führen zu steigenden Strombedarfen und häufig zu einer Erhöhung der Netzanschlusskapazität. Damit es zu keinen Verzögerungen im Anschlussverfahren z. B. durch Ausbaumaßnahmen oder prozessuale Engpässe beim Netzbetreiber kommt, ist eine frühzeitige Interaktion zwischen Industrieunternehmen und Netzbetreiber sinnvoll.

Neben weiteren Lösungsinstrumenten, die im Verlauf der Kooperationsforen vertieft werden, sind regionale Netzdialoge zwischen zuständigen Netzbetreibern und den Unternehmen bzw. Großabnehmern im Netzgebiet ein niederschwelliges Format, um Verzögerungen von Elektrifizierungsmaßnahmen aufgrund fehlender infrastruktureller Voraussetzungen zu vermeiden. Die Akzeptanz solcher Formate könnte über einen Förderbonus (vgl. Teilnahme an Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerken) bei anschließender Maßnahmenumsetzung hergestellt werden.

II. Anforderungen an Verfügbarkeiten und Regelbarkeiten bei Flexibilisierung
Häufig sind einzelne Prozesse bzw. Prozessschritte für sich genommen flexibel. Jedoch sind diese immer in der Integration in den Gesamtstandort zu betrachten. Einzelne Prozessschritte sind in der Regel abhängig von vor- und nachgelagerten Produktionsprozessen und Liefervereinbarungen mit den Kunden.

In der Ausarbeitung von Flexibilitätsanforderungen ist neben den einzelnen Anlagen(teilen) immer der Gesamtverbund des Standortes zu berücksichtigen. Für sich genommen flexible Prozessschritte ermöglichen daher nicht immer auch eine umsetzbare Flexibilitätsmaßnahme. In einigen Fällen sind technische Ertüchtigungen möglich und notwendig (bspw. Pufferspeicher, hybride Systeme, ...). Sollte dies nicht möglich sein, müssen die existierenden technischen Limitationen auch in den regulatorischen Anforderungen Berücksichtigung finden.

III. Historisch gewachsene Anlagenstrukturen am Standort & Gebäudestatik
Zahlreiche Standorte sind als Brownfield historisch gewachsen und erfordern damit teilweise zusätzliche Ertüchtigungen bzw. Aufwände, um konkrete Investitionsmaßnahmen umzusetzen. Die Spannbreite reicht dabei von unzureichender Statik für in der Regel wirtschaftliche Dach-PV-Anlagen bis hin zu stark integriert verbauten Anlagenteilen, beispielsweise fossilen Gaskesseln oder Öfen, die nicht ohne weiteres ausgebaut

Technische & technologische Hürden in der Praxis

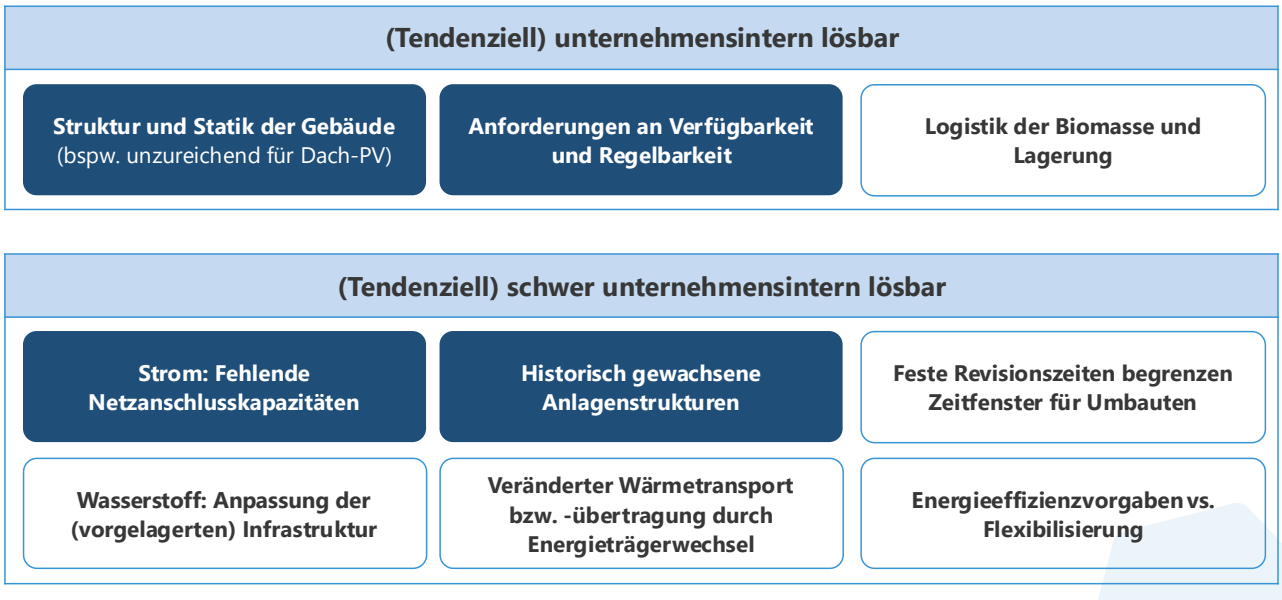


Abbildung 4-3: Technische & technologische Hürden bei der Umsetzung von Investitionsmaßnahmen in der Industrie.

und ersetzt werden können. Scheinbar „einfache“ Transformationsmaßnahmen können daher mit erheblichem zusätzlichen, höheren Aufwand in der Umsetzung verbunden sein.

Pauschale Aussagen zur Umsetzbarkeit einzelner Maßnahmen sind nur eingeschränkt zulässig. Ziel ist daher, ein möglichst breites Portfolio an Anbietern mit technisch verfügbaren und potenziell wirtschaftlich einsetzbaren Technologien zur Auswahl zu haben, um die Betreiber der einzelnen Standorte zu einer eigenständigen, individuellen Auswahl zu befähigen.

Weitere technische & technologische Hemmnisse
Weitere technisch-technologische Hemmnisse in der Praxis umfassen u. a.:

- **Fehlende (langfristige) Betriebserfahrungen** unter verschiedenen Betriebsbedingungen für Transformationstechnologien. Auch technisch marktreif verfügbare Technologien werden in der Regel stufenweise erprobt und eingeführt, um Betriebserfahrung zu sammeln und einen reibungslosen Umstieg zu ermöglichen.
- Für die Zeitschienen zur Umsetzung von Investitionsmaßnahmen sind teilweise **fest vorgegebene TÜV- und Revisionszyklen** zu berücksichtigen. Diese begrenzen die Eingriffsmöglichkeiten in bestehende Anlagenstrukturen. Umbauten sind dann nur im Rahmen geplanter Stillstände möglich. Die verfügbaren Zeitfenster begrenzen dabei auch den Umfang der umsetzbaren Umbauten. Sie erfordern lange Vorlaufzeiten und eine frühzeitige Planung.
- Energieträgerwechsel und verstärkte Abwärmenutzung führen häufig zu **verändertem Wärmetransport und -übertragung**, was weitere Anpassungen in Steuerung und ggf. Infrastruktur zur Folge haben kann.
- Es besteht ein **Zielkonflikt zwischen Flexibilitätsanforderungen und Energieeffizienzvorgaben,** z. B. im Rahmen von Managementsystemen (ISO 50001). Flexible Fahrweisen bedeuten immer eine Abweichung vom Auslegungs-/optimalen Betriebspunkt und damit meist (energetische) Ineffizienz.
- Beim Einsatz von Wasserstoff sind in der Regel sowohl werksinterne als auch vorgelagerte **infrastrukturelle Anpassungen** erforderlich, die zu den eigentlichen Investitionskosten hinzukommen und auch zeitlich berücksichtigt werden müssen.
- Für **Biomasse** ist neben den bereits beschriebenen regulatorischen Unklarheiten auch die komplexe Logistik sowie Lagerung eine zentrale Herausforderung. Hoher Flächenbedarf, spezielle sicherheitstechnische Anforderungen sowie saisonale Verfügbarkeiten erschweren eine kontinuierliche und flexible Brennstoffversorgung.

4.3 Weitere Hemmnisse: Randthemen mit großer Wirkung

Politisch/regulatorische sowie technisch-technologische Hemmnisse stellen neben der marktreifen und wirtschaftlichen Verfügbarkeit die am weitest verbreiteten Umsetzungshemmnisse dar. Nichtsdestotrotz führen auch weitere soziale und organisationsbezogene sowie ökologische Aspekte zu Verzögerungen und müssen somit ebenfalls berücksichtigt werden.

Sozial & organisationsbezogen:
Die Zusammenarbeit muss stimmen
Die neuen Anforderungen, sowohl an Resilienz als auch ökologische Nachhaltigkeit, erfordern häufig auch einen internen Wissensaufbau, ein Umdenken bei bisher etablierten Prozessen und die Offenheit zur Erprobung kreativer Ansätze. Daher spielen soziale und organisationsbezogene Hemmnisse eine nicht zu unterschätzende Rolle in der Transformation der Industrie:

- Motivierte und engagierte Projektmanager:innen stoßen oft auf eine **„Never change a running system“-Mentalität.** Bestehende, zuverlässig funktionierende Prozesse, Anlagen und Steuerungen werden bevorzugt beibehalten, auch wenn sie nicht optimal auf zukünftige Anforderungen ausgerichtet sind. Änderungsprozesse werden somit verzögert oder nur inkrementell umgesetzt.
- Die Ursache fehlender Umsetzung kann auch in **fehlenden personellen Kapazitäten** liegen. Die Entwicklung, Bewertung und Umsetzung neuer Konzepte erfordert zusätzliches (teilweise neues) Wissen und Zeit, die im bestehenden Tagesgeschäft oft nicht zur Verfügung steht. Das operative Geschäft priorisiert häufig kurzfristige Aufgaben, wodurch die Entwicklung langfristiger, strategischer Konzepte in den Hintergrund rückt.
- Neben personellen Engpässen können auch **Flächenbedarfe und eingeschränkte Grundstücksverfügbarkeiten** die Umsetzung von Transformationsmaßnahmen limitieren. V. a. in bestehenden Industriearealen oder dicht besiedelten Regionen ist zusätzlicher Platz für neue Anlagen, Infrastruktur oder Speicherlösungen nur begrenzt verfügbar, was selbst bei technischer Verfügbarkeit die Auswahl geeigneter Technologien einschränkt.

- Neben der internen Motivation muss zudem auch die **Kooperationsbereitschaft lokaler und kommunaler Akteure,** etwa im Kontext der Abwärmeauskopplung, gegeben sein. Unterschiedliche Zielsysteme, unklare Verantwortlichkeiten oder Unsicherheiten bezüglich langfristiger Bindungen können dazu führen, dass potenziell sinnvolle Kooperationen nicht zustande kommen.
- Hinzu kommt, dass die Auswirkungen von Entscheidungen – technisch, wirtschaftlich oder organisatorisch – insbesondere in unruhigen Zeiten nur **schwer abschätzbar** sind. Diese Unsicherheit führt nicht selten zu Zurückhaltung oder Entscheidungsaufschub, wodurch Projekte weiter verzögert oder gar nicht angestoßen werden.

Erfahrungsberichte aus dem Kooperationsforum zeigen: Eine aktive Einbindung sowohl der Entscheider als auch der Prozessverantwortlichen durch Erklären von Hintergründen und Vorteilen kann die Motivation zur Erprobung und Umsetzung neuer Ansätze stärken. Gemeinsame, kooperative Ansätze können häufig zu einer Win-Win-Situation zwischen mehreren Unternehmen, Netzbetreibern und/oder kommunalen Akteuren führen.

Ökologisch: Anforderung an Dekarbonisierungstechnologien sinnvoll ausgestalten

Ökologische Anforderungen sind ein zentraler Bestandteil der industriellen Transformation. Sie stellen sicher, dass Maßnahmen zur Treibhausgasminderung nicht zu unerwünschten Verlagerungseffekten, neuen Umweltbelastungen oder nicht nachhaltigen Ressourcenpfaden führen. Gleichzeitig können sehr komplexe oder uneinheitliche Anforderungen die Umsetzung von Dekarbonisierungsmaßnahmen erschweren, insbesondere wenn Unternehmen bereits in frühen Projektphasen hohe Nachweis-, Prüf- oder Genehmigungsanforderungen erfüllen müssen. Erhöhte Anforderungen in Planung, Genehmigung und Monitoring verlängern Projektlaufzeiten und erhöhen die Komplexität, insbesondere bei innovativen oder systemintegrierten Lösungen.

- **Hohe Nachhaltigkeitsanforderungen an Biomasse** stellen ein relevantes Hemmnis dar. Vorgaben zu Herkunft, Zertifizierung und Nutzungskonkurrenzen schränken die verfügbare Menge ein und erhöhen den Aufwand für Beschaffung und Nachweisführung, was den Einsatz in Projekten erschwert und Kosten erhöht.

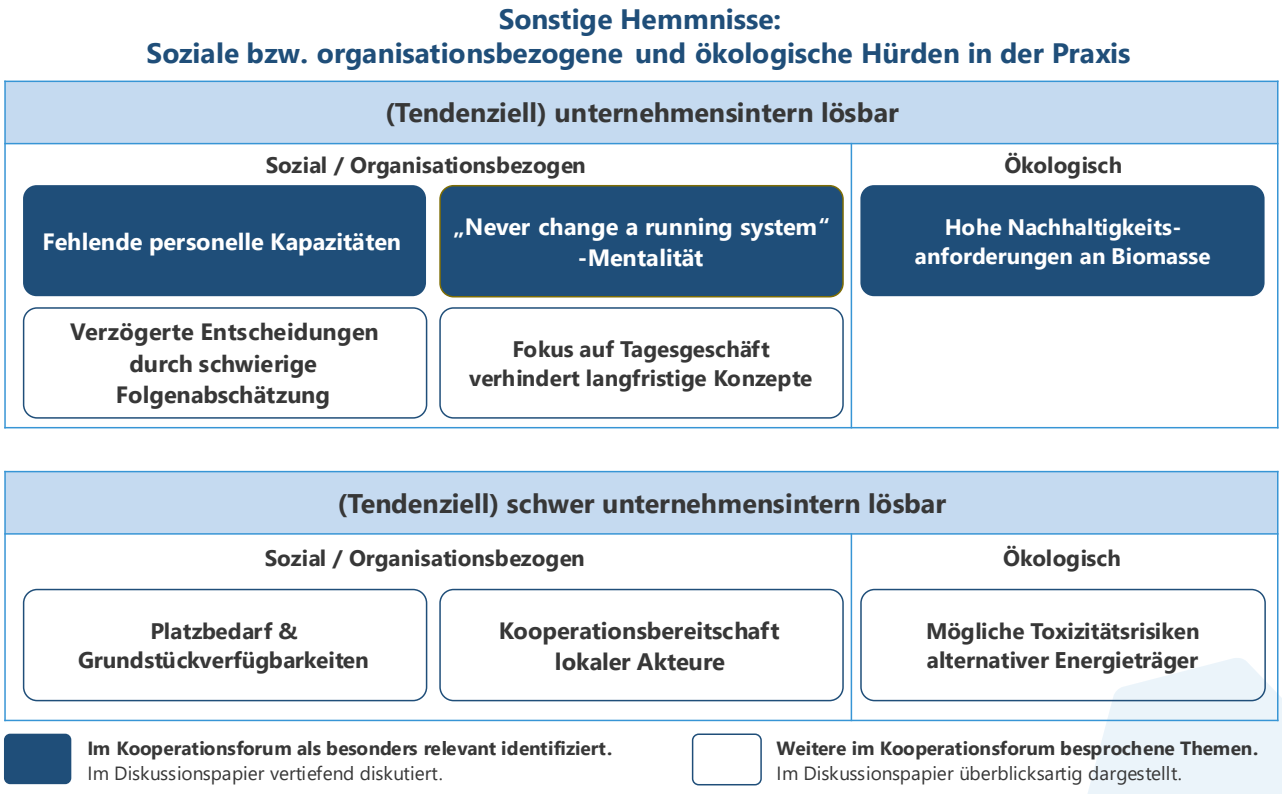


Abbildung 4-4: Soziale / organisationsbezogene und ökologische Hürden bei der Umsetzung von Investitionsmaßnahmen in der Industrie.

- Darüber hinaus bestehen Vorbehalte gegenüber alternativen Energieträgern, Kältemittel o. ä. aufgrund möglicher **Toxizitäts- und Sicherheitsrisiken**. Insbesondere neue oder wenig erprobte Stoffe erfordern zusätzliche Prüfungen, Sicherheitskonzepte und Akzeptanzprozesse, was den Implementierungsaufwand erhöht.

Im Zielkonflikt, den nachhaltigen Transformationsoptionen einen Markthochlauf zu ermöglichen und dennoch ökologische Leitplanken einzuhalten, entstehen häufig Unklarheiten oder bürokratische Anforderungen, die diese Optionen weniger attraktiv machen. Es gilt in der Abwägung der verschiedenen berechtigten Ziele eine Priorisierung vorzunehmen, um Lösungen und Anforderungen praktikabel zu halten.

5 Abbau praktischer Umsetzungshemmnisse zur Aktivierung von Investitionen

Die Transformation der Industrie ist technisch in vielen Bereichen möglich, wirtschaftlich jedoch häufig noch herausfordernd und in der praktischen Umsetzung mit zusätzlichen Hemmnissen verbunden. Um Investitionen in Elektrifizierung, Energieträgerwechsel und hybride Versorgungskonzepte zu aktivieren, reicht es daher nicht aus, einzelne Technologien verfügbar zu machen. Entscheidend ist ein verlässlicher, praxistauglicher und umsetzungsorientierter Rahmen, der Unternehmen befähigt, konkrete Maßnahmen standortspezifisch zu bewerten und schrittweise umzusetzen.

Die Erfahrungen im Kooperationsforum Industrie zeigen, dass die Hemmnisse der Transformation vielschichtig sind. **Technologische Lücken** bestehen insbesondere bei kontinuierlichen Hochtemperatur- und Hochdurchsatzprozessen, bei denen Elektrifizierung heute noch nicht in allen Fällen eine skalierbare Lösung darstellt. Gleichzeitig sind viele Technologien grundsätzlich verfügbar, werden jedoch **aufgrund fehlender Wirtschaftlichkeit** – insbesondere durch unsichere Energiepreis- und Netzentgeltentwicklungen oder hohe Anforderungen an Netzanschluss, Infrastruktur und Anlagenintegration – nicht umgesetzt. Hinzu kommen **organisatorische, regulatorische und standortspezifische Faktoren,** die in übergeordneten Transformationspfaden häufig unterschätzt werden.

Die Erhöhung der Planungssicherheit ist die wichtigste Voraussetzung für positive Investitionsentscheidungen. Unternehmen benötigen **langfristig verlässliche politische und regulatorische Rahmenbedingungen**. Dies betrifft auf regulatorischer Seite bspw. die Ausgestaltung von Strompreisbestandteilen (Steuern, Abgaben, Umlagen) und Netzentgelten, die zukünftige Rolle von Wasserstoff und Biomasse, die Entwicklung von CO_2-Preissignalen sowie die regulatorische Behandlung von Flexibilitätsoptionen und Speichern. Offene Festlegungsverfahren sollten zügig, transparent und rechtssicher abgeschlossen werden. Gleichzeitig sollten bestehende Instrumente nicht wiederholt grundlegend in Frage gestellt werden, da dies Investitionsentscheidungen verzögert und die Bewertung bereits geplanter Maßnahmen erschwert.

Neben regulatorischer Verlässlichkeit braucht es praxisnahe **wirtschaftliche Anreize.** Förderinstrumente sollten stärker an den realen Umsetzungsbedingungen industrieller Standorte ausgerichtet werden. Dazu gehören lange – zum Teil schwer vorhersehbare – Projektlaufzeiten, notwendige Peripherieinvestitionen, Kosten für Infrastrukturertüchtigung sowie Risiken durch Lieferzeiten, Genehmigungen und Marktvolatilitäten.

Als Voraussetzung muss die notwendige **Infrastrukturentwicklung** stärker mit industriellen Transformationspfaden verzahnt werden. Fehlende oder verzögerte Netzanschlusskapazitäten können Elektrifizierungsprojekte selbst dann verhindern, wenn Technologie und Wirtschaftlichkeit grundsätzlich gegeben sind. Regionale Netzdialoge zwischen Netzbetreibern, Industrieunternehmen und weiteren relevanten Akteuren können dazu beitragen, Bedarfe frühzeitig sichtbar zu machen, Ausbaupfade besser abzustimmen und Anschlussprozesse zu beschleunigen. Solche Formate sollten niedrigschwellig etabliert und durch geeignete Anreizmechanismen gestärkt werden.

Auf Unternehmensebene bleibt die Transformation aufgrund der großen Heterogenität der Industrielandschaft eine **standortspezifische Aufgabe.** Historisch gewachsene Anlagenstrukturen, begrenzte Flächen, feste Revisionszyklen, Anforderungen an Produktqualität und Versorgungssicherheit sowie interne Wirtschaftlichkeitsvorgaben beeinflussen die Umsetzbarkeit einzelner Maßnahmen maßgeblich. Pauschale Aussagen zur „besten" Technologie sind daher zunächst lediglich im Sinne einer Orientierungshilfe zu verstehen. Zielführender sind breite Lösungsportfolios, die Elektrifizierung, Energieträgerwechsel, Effizienzmaßnahmen, Abwärmenutzung, Speicher und flexible Betriebsweisen jeweils anwendungsbezogen kombinieren. **Hybridisierung** kann dabei eine wichtige Brückenfunktion übernehmen, indem sie Transformationsrisiken reduziert und Unternehmen schrittweise Handlungsoptionen eröffnet. Zu beachten ist dabei, dass Hybridisierung häufig die Grundlage für Energieflexibilitätspotenziale durch Brennstoffwechsel schafft. Bei einer langfristig vollständigen Elektrifizierung können diese Flexibilitätspotenziale entfallen.

Darüber hinaus sollten **organisatorische Hemmnisse** aktiv adressiert werden. Transformationsprojekte konkurrieren im Unternehmensalltag mit operativen Aufgaben, begrenzten personellen Kapazitäten und etablierten Routinen. Wissensaufbau, interne Akzeptanz und die Einbindung von Prozessverantwortlichen sind daher zentrale Erfolgsfaktoren. Erfahrungen aus dem Kooperationsforum zeigen, dass eine frühe und transparente Kommunikation technischer, wirtschaftlicher und strategischer Vorteile die Bereitschaft zur Erprobung neuer Lösungen erhöhen kann. Transformation gelingt durch verständliche Entscheidungsgrundlagen und den Austausch zwischen Unternehmen, Technologieanbietern, Netzbetreibern und Politik.

Die Elektrifizierung der Industrie ist ein zentraler Baustein einer wettbewerbsfähigen, nachhaltigen, resilienten und treibhausgasneutralen Industrie, kann jedoch nicht isoliert betrachtet werden. Für viele Anwendungen wird sie durch Energieträgerwechsel, hybride Anlagenkonzepte, Flexibilitätsoptionen und Effizienzmaßnahmen ergänzt werden müssen. Entscheidend ist, dass die beschriebenen Hemmnisse systematisch abgebaut werden. Dazu braucht es verlässliche Rahmenbedingungen, praxistaugliche Förderinstrumente, abgestimmte Infrastrukturplanung und eine realistische Berücksichtigung betrieblicher Umsetzungsvoraussetzungen.

Das Kooperationsforum Industrie zeigt, dass ein solcher gemeinschaftlicher Ansatz möglich ist: Durch den strukturierten Austausch zwischen Unternehmen, Energiewirtschaft und weiteren Akteuren werden Hemmnisse sichtbar, Lösungsoptionen konkretisiert und gemeinsame und praxistaugliche Handlungsbedarfe formuliert. Damit leistet das Forum einen Beitrag dazu, Transformationsvorhaben von der konzeptionellen Ebene in die praktische Umsetzung zu überführen. Statt einzelne Technologien pauschal zu priorisieren, sollen Unternehmen befähigt werden, unter ihren jeweiligen Standortbedingungen tragfähige Transformationspfade zu entwickeln. So kann der Abbau praktischer Umsetzungshemmnisse zur Aktivierung von Investitionen beitragen – und damit zur Stärkung eines zukunftsfähigen Industriestandorts.

Zur Initiative der Kooperationsforen

Erklären statt fordern. - Gemeinsam Lösungen finden. - Den Wirtschaftsstandort stärken.

Unter diesen Leitmotiven arbeiten **über 130 Unternehmen** aus Schlüsselbranchen sowie der Energiewirtschaft gemeinsam an praxistauglichen Lösungen für Netzanschluss und Netzintegration. Netzanschlüsse werden zu einem Engpass für industrielle Transformation und neue Anwendungen. Verzögerungen und fehlende Transparenz wirken sich direkt auf Investitionsentscheidungen und die Wettbewerbsfähigkeit des Standorts Deutschland aus.

In fünf separaten Kooperationsforen wird das Problem der Engpässe beim Netzanschluss sowie weitere Handlungsfelder mit Bezug zur zunehmenden Elektrifizierung bearbeitet:

- Kooperationsforum **Großbatteriespeicher,**
- Kooperationsforum Elektrifizierung der **Logistik,**
- Kooperationsforum Elektrifizierung der **Industrie,**
- Kooperationsforum **Elektrolyse,**
- Kooperationsforum **Rechenzentren.**

Die Kooperationsforen werden durch ein übergreifendes, punktuell eingebundenes Querschnittsforum der **Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber** ergänzt.

Je identifiziertem Handlungsfeld bieten die Kooperationsforen einen geschützten Raum für **strukturierten Austausch,** sachliche Diskussionen und die gemeinsame Erarbeitung von Lösungsansätzen. Diese werden durch tiefergehende, wissenschaftliche Analysen zu aktuellen Problemstellungen **wissenschaftlich begleitet.** Die **gemeinsam erarbeiteten Lösungsbausteine** sind somit praxistauglich und konsensfähig.



Literaturverzeichnis

[1] Veitengruber, Frank; Dufter, Christa; Gruber, Anna; Hübner, Tobias; Guminski, Andrej; Kleinertz, Britta; von Roon, Serafin: Potenzialanalyse zur Hybridisierung von Prozessen in der Grundstoffindustrie. Wien: TU Wien, 2019.

[2] Kracht, Hannes; Guminski, Andrej; Gruber, Anna; Fill, Andreas; Platzdasch, Aicha; Schulz, Leandra; Allolio, Friederike: Dekarbonisierungsoptionen für die Sächsische Wirtschaft - Untersuchung zum Stand der Dekarbonisierung in ausgewählten Schlüsselbranchen der sächsischen Wirtschaft. Dresden: Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit, Energie und Klimaschutz, 2026.

[3] Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Hirzel, Simon; Neusel, Lisa; Aydemir, Ali: CO2-neutrale Prozesswärmeerzeugung - Umbau des industriellen Anlagenparks im Rahmen der Energiewende: Ermittlung des aktuellen SdT und des weiteren Handlungsbedarfs zum Einsatz strombasierter Prozesswärmeanlagen. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2023.

[4] High Voltage Electrode Boiler. In https://parat.no/products/ieh-high-voltage-electrode-boiler. (Abruf am 2026-06-24); Flekkefjord, Norwegen: PARAT Halvorsen AS, 2026.

[5] Können Sie sich eine Wärmepumpe so groß wie ein Fußballfeld vorstellen?. In https://www.basf.com/global/de/who-we-are/sustainability/change-for-climate/heatpump. (Abruf am 2026-06-24); Ludwigshafen, Deutschland: BASF SE, 2026.

[6] Biggest piston-based high-temperature industrial heat pump. In https://heaten.com/technology. (Abruf am 2026-06-24); Köln, DE: Heaten, 2026.

www.ffe.de