



TransHyDE-Projekt Systemanalyse

Systemanalyse zu Transportlösungen für grünen Wasserstoff - Teilvorhaben der PTS: Analyse der möglichen Infrastrukturentwicklungen als Funktion der Transformationspfade der Nutzung von grünem Wasserstoff in der Papiererzeugung

Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil I: Kurzbericht

Stand:	31.03.2026
Einreichungsdatum (TIB):	31.03.2026
Partnerin/Partner:	PTS – Institut für Fasern & Papier gGmbH (vormals Papiertechnische Stiftung)
Autorin/Autor:	Mike Schiefer
Fördertitel:	Verbundvorhaben TransHyDE_FP1: Systemanalyse zu Transportlösungen für grünen Wasserstoff - Teilvorhaben der PTS: Analyse der möglichen Infrastrukturentwicklungen als Funktion der Transformationspfade der Nutzung von grünem Wasserstoff in der Papiererzeugung
Förderkennzeichen:	03HY201P
Disclaimer:	<i>Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor/den Autoren.</i>

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU



Gefördert durch:



Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildungsverzeichnis	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Tabellenverzeichnis	Fehler! Textmarke nicht definiert.
I. Ursprüngliche Aufgabenstellung	3
II. Vormaliger Stand des Wissens	3
III. Ablauf des Vorhabens	3
IV. Wesentliche Ergebnisse	4
Literaturverzeichnis	6



I. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Das Teilvorhaben der PTS war Bestandteil des Verbundprojekts TransHyDE-Systemanalyse und hatte die Aufgabe, die Transformationspfade der europäischen Zellstoff- und Papierindustrie hin zu einer klimaneutralen Energieversorgung systematisch zu untersuchen. Ziel war es, die Rolle von grünem Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem zu bewerten und daraus Anforderungen für den Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur abzuleiten.

Ausgangspunkt war die besondere Struktur der Branche: Die Papier- und Zellstoffindustrie zählt zu den energieintensiven Industrien und ist stark durch thermische Prozesse geprägt. Gleichzeitig bestehen verschiedene Dekarbonisierungsoptionen – insbesondere Elektrifizierung, Einsatz biogener Energieträger und Effizienzsteigerungen –, deren komplexes Zusammenspiel mit einem möglichen Wasserstoffeinsatz bislang nicht ausreichend durchdrungen wurde. Vor diesem Hintergrund sollte eine fundierte, datenbasierte Grundlage geschaffen werden, um zukünftige Entwicklungen konsistent beschreiben zu können.

Die Arbeiten umfassten daher die detaillierte Erhebung des Status quo von Energieverbrauch, Produktionsstrukturen und Prozessrouten, die Analyse technologischer Entwicklungspfade sowie die Entwicklung von Szenarien bis zum Jahr 2050. Ein zentrales Ziel bestand außerdem darin, die Ergebnisse so aufzubereiten, dass sie direkt in Energiesystemmodelle integriert werden können. Damit sollte eine Brücke zwischen industrieller Detailanalyse und systemischer Betrachtung geschlagen werden.

II. Vormaliger Stand des Wissens

Zum Projektbeginn lagen bereits Studien und statistische Auswertungen für die Papierindustrie vor, die ein solides Bild des aktuellen Energieverbrauchs sowie grundlegender Effizienzpotenziale vermittelten. Auch strategische Roadmaps der Branche existierten, die langfristige Emissionsminderungsziele formulierten. (1) (2) (3) (4) (5)

Allerdings wiesen diese Arbeiten erhebliche Lücken auf. Insbesondere fehlte eine konsistente, europaweit vergleichbare Datengrundlage mit ausreichender räumlicher und prozessualer Auflösung. Vorhandene Daten waren meist aggregiert und nur eingeschränkt für Modellierungszwecke geeignet. Gleichzeitig bestand eine deutliche Trennung zwischen industriebezogenen Analysen und Energiesystemmodellen, die industrielle Detailstrukturen nur unzureichend abbildeten.

Ein weiterer zentraler Mangel lag in der fehlenden Quantifizierung des zukünftigen Wasserstoffbedarfs. Zwar wurde Wasserstoff in energiepolitischen Strategien zunehmend als wichtiger Baustein gesehen, belastbare sektor- und standortspezifische Abschätzungen für die Zellstoff- und Papierindustrie existierten jedoch nicht. Ebenso fehlte eine integrierte Betrachtung, die industrielle Nachfrageentwicklung und Infrastrukturaufbau miteinander verknüpft.

Insgesamt bestand somit ein Bedarf an einer systemischen, datenbasierten Analyse, die industrielle Realität, technologische Entwicklung und Energiesystemperspektive zusammenführt.

III. Ablauf des Vorhabens

Der Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Analyse der Infrastrukturentwicklung aus Perspektive der Akteure. Zu Beginn wurde eine umfassende Datengrundlage zur europäischen Zellstoff- und



Papierindustrie aufgebaut. Hierfür wurde ein kombinierter methodischer Ansatz gewählt: Einerseits wurden statistische Daten und Referenzwerte aus bestehenden Studien ausgewertet, andererseits erfolgte eine detaillierte standortspezifische Erhebung. Auf diese Weise konnten rund 800 Produktionsstandorte in Europa strukturiert erfasst und hinsichtlich Kapazitäten, Prozessrouten und Energieverbräuchen beschrieben werden.

Darauf aufbauend wurde die Energie- und Prozessstruktur der Branche detailliert analysiert. Ziel war es, den Energieeinsatz entlang der gesamten Wertschöpfungskette prozessscharf zu quantifizieren und Unterschiede zwischen verschiedenen Produktionsrouten herauszuarbeiten. Diese Analyse bildete die Grundlage für alle weiteren Arbeiten.

Parallel dazu wurden technologische Entwicklungen systematisch untersucht. Dabei wurden sowohl kurzfristig verfügbare Effizienzmaßnahmen als auch mittel- und langfristige Innovationen berücksichtigt. Ergänzend wurden Entwicklungen im Energiesystem – insbesondere Elektrifizierung, erneuerbare Energien und Wasserstoff – in die Betrachtung integriert, um konsistente Transformationspfade ableiten zu können.

Auf Basis dieser Arbeiten wurden Szenarien für die Entwicklung der Branche bis 2050 entwickelt. Diese Szenarien verknüpfen Produktionsentwicklung, Technologieeinsatz und Energiebedarf und bilden unterschiedliche Entwicklungspfade ab, die sowohl technologische als auch regulatorische Unsicherheiten berücksichtigen.

Abschließend wurden alle Daten und Ergebnisse in eine modellierungsfähige Form überführt und in enger Abstimmung mit den Projektpartnern in Energiesystemmodelle integriert. Damit wurde eine zentrale Schnittstelle zwischen industrieller Detailanalyse und übergeordneter Systemmodellierung geschaffen.

IV. Wesentliche Ergebnisse

Ein zentrales Ergebnis des Vorhabens ist der Aufbau einer konsistenten und detaillierten Datengrundlage für die europäische Zellstoff- und Papierindustrie. Erstmals liegt damit eine europaweite, standort- und prozessscharfe Beschreibung der Branche vor, die unmittelbar für Modellierungszwecke genutzt werden kann. Diese Datengrundlage bildet die Basis für alle weiteren Analysen und stellt einen wesentlichen Mehrwert des Projekts dar.

Die Auswertung der Energie- und Prozessstruktur zeigt, dass die Branche weiterhin stark durch thermische Prozesse geprägt ist, insbesondere durch energieintensive Trocknungsprozesse. Gleichzeitig bestehen erhebliche Unterschiede zwischen verschiedenen Prozessrouten und Produktsegmenten, die sich deutlich auf den Energiebedarf auswirken. Diese Differenzierung ist entscheidend für die realistische Abbildung der Branche in Energiesystemmodellen.

Die Analyse technologischer Optionen macht deutlich, dass die Dekarbonisierung der Papierindustrie nur durch eine Kombination verschiedener Maßnahmen erreicht werden kann. Eine zentrale Rolle spielen dabei die Elektrifizierung von Prozessen, der Einsatz von Wärmepumpen, die Nutzung biogener Energieträger sowie ergänzend der Einsatz von Wasserstoff in thermischen Anwendungen, z.B. Trocknungsprozessen. Einzelne Technologien sind dabei nicht ausreichend; vielmehr ist ein integrierter Ansatz erforderlich.

Die entwickelten Szenarien zeigen, dass erhebliche Energieeinsparungen möglich sind, gleichzeitig aber eine große Unsicherheit hinsichtlich der zukünftigen Energieträgerstruktur besteht. Insbesondere



Gefördert durch:



der Einsatz von Wasserstoff variiert stark zwischen den Szenarien und hängt wesentlich von technologischen, wirtschaftlichen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen ab.

Der ermittelte Wasserstoffbedarf der Branche liegt im Vergleich zu anderen Industriesektoren auf einem moderaten Niveau, ist jedoch systemisch relevant. Für Deutschland ergibt sich ein Bedarf in der Größenordnung von etwa 8 TWh, wobei der Einsatz vor allem in thermischen Prozessen erfolgt. Die Papierindustrie kann damit als stabiler, kontinuierlicher Verbraucher im zukünftigen Wasserstoffsystem eingeordnet werden.

Gleichzeitig zeigt die Analyse, dass die Transformation der Branche mit erheblichen Herausforderungen verbunden ist. Dazu zählen insbesondere die hohe Prozessintegration, kontinuierliche Produktionsbedingungen, lange Investitionszyklen sowie die begrenzte Substituierbarkeit einzelner Prozesse. Darüber hinaus spielen externe Faktoren wie Energiepreise, Infrastrukturverfügbarkeit und regulatorische Rahmenbedingungen eine entscheidende Rolle.

Insgesamt leisten die Arbeiten einen wesentlichen Beitrag zur Integration der Papierindustrie in die Energiesystemanalyse. Sie ermöglichen erstmals eine konsistente Bewertung von Transformationspfaden, Energiebedarfen und Infrastrukturanforderungen und bilden damit eine fundierte Grundlage für zukünftige Planungen im Kontext der Wasserstoffwirtschaft.



Gefördert durch:



Literaturverzeichnis

1. **Birkner's PAPER World.** Digitale Firmen – Datenbank der internationalen Papierindustrie. s.l. : Online. <https://www.paper-world.com/de/branchenbuch/firmen-datenbank>.
2. **CEPI - Confederation of European Paper Industries.** KEY STATISTICS 2020 – European pulp & paper industry. Brüssel : Online, 2021. <https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2021/07/Key-Stats-2020-FINAL.pdf>.
3. —. The Forest Fibre Industry – 2050 Roadmap to a low-carbon bio-economy. Brüssel : s.n., 2011. https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2020/08/2050_roadmap_final.pdf.
4. —. Two Team Project. Brüssel : s.n., 2013.
5. **VDP -Verband Deutscher Papierfabriken e.V.** VDP-Leistungsbericht PAPIER 2021. Bonn : s.n., 2021. <https://www.papierindustrie.de/papierindustrie/statistik>.



TransHyDE-Projekt Systemanalyse

Systemanalyse zu Transportlösungen für grünen Wasserstoff - Teilvorhaben der PTS: Analyse der möglichen Infrastrukturentwicklungen als Funktion der Transformationspfade der Nutzung von grünem Wasserstoff in der Papiererzeugung

Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil II: Langfassung

Stand:	31.03.2026
Einreichungsdatum (TIB):	31.03.2026
Partnerin/Partner:	PTS – Institut für Fasern & Papier gGmbH (vormals Papiertechnische Stiftung)
Autorin/Autor:	Mike Schiefer
Fördertitel:	Verbundvorhaben TransHyDE_FP1: Systemanalyse zu Transportlösungen für grünen Wasserstoff - Teilvorhaben der PTS: Analyse der möglichen Infrastrukturentwicklungen als Funktion der Transformationspfade der Nutzung von grünem Wasserstoff in der Papiererzeugung
Förderkennzeichen:	03HY201P
Disclaimer:	<i>Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor/den Autoren.</i>

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU



Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
I. Ursprüngliche Aufgabenstellung	7
II. Vormaliger Stand des Wissens	8
III. Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten	9
III.1 AP 1: Verbundkoordination	10
III.2 AP 2: Infrastrukturentwicklung (Akteursperspektive)	11
III.2.1 AP 2.1: Status-Quo regionale Energieerzeugung und -verbrauch	11
III.2.2 AP 2.2: Technologieentwicklung in Erzeugung und Industrieanwendungen	11
III.2.3 AP 2.3: Szenarienbildung: Erzeugungs- und Verbrauchssektoren	12
III.2.4 AP 2.4: Techno-ökonomische Analyse der Infrastruktur	12
III.3 AP 4: Modellvergleich	13
III.4 AP 5: Nachhaltigkeitsbewertungen	13
III.5 AP 6: Integration und Kommunikation	13
III.6 AP 7: Roadmapping	13
IV. Wesentliche Ergebnisse	13
IV.1 Aufbau einer konsistenten Datenbasis der europäischen Papierindustrie	13
IV.2 Analyse der Energie- und Prozessstruktur der Industrie	15
IV.2.1 Faserrohstoffherzeugung	15
IV.2.2 Papierherstellung	16
IV.3 Technologieoptionen und Transformationspfade	16
IV.4 Entwicklung konsistenter Transformationsszenarien	17
IV.5 Wasserstoffbedarf und Einordnung in bestehende Studien	19
IV.6 Herausforderungen der industriellen Transformation	20
IV.7 Datenaufbereitung für die Energiesystemmodellierung	21
IV.8 Gesamtbewertung und Systembeitrag	23
V. Verwendung der Zuwendung	23
V.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	23
V.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten	23
VI. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans ..	24
VII. Fortschritt des Projektumfelds während der Laufzeit	25



Gefördert durch:



VIII. Erfolgte Veröffentlichungen	26
Literaturverzeichnis	27



Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BAT / BREF	Best available techniques / Best available techniques reference document
CEPI	Europäischer Papierverband – Confederation of European Paper Industries
DPI / VDP	Deutscher Papierverband – Die Papierindustrie e.V. (vormals Verband Deutscher Papierfabriken e.V.)
EU27+3	EU-Staaten + Großbritannien, Norwegen und Schweiz
FfE	Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.
PTS	Institut für Fasern & Papier gGmbH (vormals Papiertechnische Stiftung)



Gefördert durch:



Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Eigene Darstellung der Standortverteilung der berücksichtigten Faserstoff- und Papier-Produktionsstätten. Kartenbasis: ©Google Maps. Datenbasis aus (5).....</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 2: Abgeschätzte Produktionsmengenentwicklung der verschiedenen Prozessrouten der Zellstoff- und Papierindustrie in der EU27+3 von 2019 bis 2050.....</i>	<i>19</i>



Gefördert durch:



Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Arbeitspakete mit Arbeitsschwerpunkten der PTS</i>	10
<i>Tabelle 2: Erfolgte Veröffentlichungen</i>	26



I. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Das Projekt „Systemanalyse“ ist ein Verbundvorhaben innerhalb des Wasserstoffleitprojekts TransHyDE. Die Systemanalyse nimmt als Querschnittsprojekt eine spezielle Funktion wahr: einerseits wird mit Hilfe von eigenen Modellierungs- und Simulationsarbeiten sowie ökologischen Analysen wesentliches Systemwissen für den zeitabhängigen Aufbau und die Kopplung der Energieinfrastrukturen generiert. Andererseits sollen Beobachtungen, Analysen und Anforderungen der Umsetzungs- und Forschungsprojekte aufgenommen sowie mit existierendem Wissen abgeglichen und übergreifend eingeordnet werden. Die Ergebnisse sollen in eine sich kontinuierlich entwickelnde Roadmap einfließen. Diese unterstützt fortlaufend die Forschungs- und Umsetzungsprojekte, identifiziert mögliche Forschungs- und Entwicklungsthemen für die nächsten Projektphasen und liefert wichtige Handlungsempfehlungen für externe Stakeholder.

Das Teilvorhaben der PTS „Analyse der möglichen Infrastrukturentwicklungen als Funktion der Transformationspfade der Nutzung von grünem Wasserstoff in der Papiererzeugung“ ist in das Verbundvorhaben TransHyDE-Sys eingebunden. Ziel dieses Teilvorhabens war es, die Transformationspfade der Zellstoff- und Papierindustrie hin zu einer klimaneutralen Energieversorgung aus Perspektive der Akteure systematisch zu analysieren und deren Implikation für den Aufbau einer zukünftigen Wasserstoffinfrastruktur abzuleiten.

Vor dem Hintergrund der energieintensiven Prozessstruktur der Papier- und Zellstoffindustrie sowie ihres signifikanten Anteils am industriellen Energieverbrauch in Europa bestand die zentrale Herausforderung darin, belastbare Aussagen zur zukünftigen Rolle von Wasserstoff im Spannungsfeld von Elektrifizierung, Biomassenutzung und Effizienzsteigerungen zu entwickeln. Hierzu war eine fundierte Datengrundlage sowie eine konsistente Verknüpfung von technologischen Entwicklungen, Produktionsstrukturen und Energiesystemen erforderlich.

Ausgehend davon umfasste die ursprüngliche Aufgabenstellung der PTS im Wesentlichen folgende Kerninhalte:

- **Erhebung und Aufbereitung des Status quo** der Energieerzeugung und des Energieverbrauchs in der europäischen Zellstoff- und Papierindustrie, einschließlich einer differenzierten Betrachtung nach Prozessrouten, Standorten und Produktsegmenten,
- **Identifikation und Bewertung technologischer Entwicklungspfade** innerhalb der Industrie sowie an den Schnittstellen zum Energiesystem, insbesondere im Hinblick auf Effizienzpotenziale, Elektrifizierung, Einsatz erneuerbarer Energieträger und die Integration von Wasserstoff,
- **Ableitung konsistenter Transformationsszenarien** für die zukünftige Entwicklung von Energiebedarf, Energieträgerstruktur und Produktionskapazitäten bis zum Jahr 2050, einschließlich der Quantifizierung potenzieller Wasserstoffbedarfe,
- Analyse der resultierenden Anforderungen an die Energie- und Wasserstoffinfrastruktur, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Entwicklungspfade und Unsicherheiten,
- sowie die **Bereitstellung einer konsistenten, modellierungsfähigen Datengrundlage** für die übergeordnete Systemanalyse und Energiesystemmodellierung im Verbundprojekt.

Ein besonderer Fokus lag dabei auf der Verknüpfung von industrieller Detailanalyse und systemischer Betrachtung. Die von der PTS erarbeiteten Daten, Annahmen und Szenarien sollten so aufbereitet



Gefördert durch:



werden, dass sie direkt in die Modellierungsarbeiten des Projektpartners Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE) integriert werden können.

Die Arbeiten zielten somit darauf ab, die spezifischen Anforderungen und Transformationsoptionen der Zellstoff- und Papierindustrie in den Gesamtkontext der Wasserstoffwirtschaft einzuordnen und eine fundierte Grundlage für die Bewertung zukünftiger Infrastrukturentwicklungen auf nationaler und europäischer Ebene zu schaffen.

II. Vormaliger Stand des Wissens

Zum Projektbeginn lag ein breites Fundament an Studien, Roadmaps und statistischen Auswertungen zur Energie- und Emissionssituation der Zellstoff- und Papierindustrie vor. Diese lieferten belastbare Erkenntnisse zum Status quo sowie zu grundsätzlichen Effizienz- und Dekarbonisierungspotenzialen, wiesen jedoch deutliche Defizite hinsichtlich einer integrierten, systemischen Betrachtung auf.

Eine zentrale Grundlage bildeten die Roadmap 2050 der CEPI von 2011 (1). Diese formulierten ambitionierte Klimaziele (bis zu 80 % Emissionsminderung) und fokussierten insbesondere auf Effizienzsteigerungen und eine Optimierung des Brennstoffmixes. Wasserstoff spielte dabei noch keine relevante Rolle. Ergänzend identifizierte das „Two Team Project“ der CEPI (2) grundlegende technologische „Breakthrough“-Ansätze, blieb jedoch auf konzeptionelle Bewertungen ohne systemische Quantifizierung beschränkt.

Parallel standen umfangreiche statistische Datenquellen (u. a. CEPI-Statistiken, BREF-Dokumente) zur Verfügung, die eine gute Beschreibung von Produktionsstrukturen und Energieverbräuchen ermöglichten. Es fehlte jedoch eine konsistente, standortscharfe und modellierungsfähige Aufbereitung auf europäischer Ebene.

Auf Ebene der Energiesystemanalyse existierten etablierte Modelle zur Bestimmung kostenoptimaler Transformationspfade. Diese bilden den Energiebedarf sektorenübergreifend ab, berücksichtigen jedoch industrielle Detailstrukturen und räumliche Verteilungen nur eingeschränkt. Gleichzeitig fehlte eine systematische Verknüpfung mit der Perspektive der Akteure, d. h. mit realen Transformationsentscheidungen und Umsetzungsdynamiken in der Industrie.

Auch im Hinblick auf Wasserstoff bestanden wesentliche Wissenslücken. Zwar wurde dessen Rolle in Strategien der European Commission und der International Energy Agency hervorgehoben, belastbare



Leitprojekt
TransHyDE

Gefördert durch:



sektor- und standortspezifische Bedarfsabschätzungen für die Papierindustrie lagen jedoch nicht vor. Ebenso fehlte eine integrierte Betrachtung von Nachfrageentwicklung und Infrastrukturaufbau.

Insgesamt mangelte es an:

- einer konsistenten, prozess- und standortscharfen Datengrundlage,
- der Verknüpfung von Industrie- und Energiesystemperspektive,
- belastbaren Wasserstoffbedarfsanalysen,
- sowie einer systemischen Einordnung in die Infrastrukturentwicklung.

Diese Lücken bildeten die zentrale Ausgangsbasis für die Arbeiten der PTS im Projekt TransHyDE-Systemanalyse.

III. Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten

Das Teilvorhaben der PTS war Bestandteil des Verbundvorhabens TransHyDE Systemanalyse, welche in sieben Arbeitspakete aufgeteilt war. Im AP 1 erfolgte die Erstellung von Berichten und die Teilnahme an verschiedenen projektspezifischen Treffen. Der Arbeitsschwerpunkt der PTS lag dabei im „AP 2 – Infrastrukturentwicklung“ mit der Datenerhebung, Recherche, Analyse, Prognose und Bewertung von Daten und Informationen zu Energieverbräuchen, Prozessrouten sowie Transformationstechnologien und -strategien für die Zellstoff- und Papierindustrie in Deutschland und Europa für das Referenzjahr 2019 und die im Projekt festgelegten Modellstützjahre bis 2050. Im AP 3 waren planmäßig keine Arbeiten erforderlich. In den AP4 bis AP7 waren unterstützende Zuarbeiten geplant und erforderlich.



Eine Übersicht über die Arbeitspakete mit den Arbeitsschwerpunkten der PTS ist in der nachfolgenden Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Arbeitspakete mit Arbeitsschwerpunkten der PTS

AP-Nr.	Titel	Arbeitsschwerpunkte der PTS
1	Verbundkoordination	Berichterstattung (viertel- und ganzjährig) Teilnahme an AP- und Verbundtreffen, Workshops, Webinaren, Jour-Fixes und Vollversammlungen
2	Infrastrukturentwicklung (Akteursperspektive)	Datenerhebung zur Erfassung des Ist-Stands der Zellstoff- und Papierindustrie in Europa in Bezug auf Produktion, Energiebedarf und Prozessrouten Recherche und Analyse von Technologieentwicklungen und Transformationsstrategien Prognose und Bewertung von Szenarien zur Transformation der Zellstoff- und Papierindustrie Aufbereitung der recherchierten und berechneten Daten zur Einbindung der Zellstoff- und Papierindustrie in die Simulationsmodelle des Projektpartners FfE
4	Modellvergleich	Unterstützung bei der Evaluierung des Infrastrukturmodells
5	Nachhaltigkeitsbewertungen	Unterstützung bei der Festlegung der Annahmen und Bilanzgrenzen für Nachhaltigkeitsbewertungen mit Fokus auf die Zellstoff- und Papierindustrie
6	Integration und Kommunikation	Unterstützung bei der Anwerbung von Stakeholdern und der Öffentlichkeitsarbeit
7	Roadmapping	Unterstützung bei der Erstellung einer Roadmap zur deutschen und europäischen Wasserstoffinfrastruktur

III.1 AP 1: Verbundkoordination

Im AP 1 erfolgten die Teilnahmen an projektspezifischen Treffen (Arbeitspaket- und Verbundtreffen, Workshops, Webinaren, Jour-Fixes und Vollversammlungen) sowie die Berichterstattung zum Projektstatus viertel- und jährlich.

Im Rahmen von AP 1 wurden von der PTS quartalsmäßig Inhalte für die Statusberichte für das TransHyDE-Projekt „Systemanalyse“ bereitgestellt sowie jährliche Zwischenberichte zu den eigenen Arbeiten und Ergebnissen im Berichtszeitraum erstellt. Zudem hat die PTS an verschiedenen Projekttreffen, Workshops, Webinaren etc. teilgenommen, insbesondere mit dem Ziel der Abstimmung der Arbeiten mit den Verbundpartnern. Weiterhin fand je nach Bedarf ein fachlicher Austausch zur Abstimmung



insbesondere zur Datenerhebung und die Einbindung der Daten in die Modellierungen mit erforderlichen Projektpartnern statt.

III.2 AP 2: Infrastrukturentwicklung (Akteursperspektive)

Der Arbeitsschwerpunkt der PTS lag im AP 2, welches sich in die folgenden Unterarbeitspakete gliedert.

III.2.1 AP 2.1: Status-Quo regionale Energieerzeugung und -verbrauch

Im AP 2.1 erfolgten Arbeiten zur Erhebung und Beschreibung des branchenspezifischen Ist-Standes von Energiebedarf und regionalem Energieverbrauch, Produktion und Prozessrouten der europäischen Papier- und Zellstoffindustrie.

Methodisch wurde ein kombinierter Top-Down-/Bottom-Up-Ansatz verfolgt. Im Top-Down-Ansatz wurden branchenspezifische Kennzahlen auf Basis von BREF-Dokumenten (3) sowie nationalen und europäischen Verbandsstatistiken (4) (5) systematisch ausgewertet. Dadurch konnten robuste Referenzwerte, insbesondere spezifische Energieverbräuche pro Tonne Endprodukt, abgeleitet und für Skalierungen nutzbar gemacht werden.

Parallel wurde im Bottom-Up-Ansatz eine hochauflösende, standortspezifische Datengrundlage aufgebaut. Hierzu wurden bestehende Datenbanken (6) umfassend ausgewertet und durch gezielte Recherchen ergänzt. Insgesamt konnten rund 800 Standorte der EU27+3 hinsichtlich Kapazitäten, Prozessrouten und Produktportfolios strukturiert erfasst werden. Datenlücken wurden systematisch durch Unternehmensinformationen, Nachhaltigkeitsberichte sowie statistische Abschätzungen geschlossen.

Ein zentraler Mehrwert des Arbeitspakets liegt in der prozessscharfen Auflösung der Energieverbräuche. Durch detaillierte Analysen der verschiedenen Produktionsketten wurden Energiebedarfe einzelnen Prozessschritten zugeordnet und nach Prozessrouten differenziert ausgewiesen. Dies ermöglicht eine konsistente Verknüpfung von Produktionsstruktur und Energieeinsatz auf europäischer Ebene.

Die so erzeugte Datengrundlage stellt eine wesentliche Voraussetzung für die nachfolgenden Analysen dar und wurde in enger Abstimmung mit dem Projektpartner FfE für die Weiterverarbeitung in der Systemmodellierung im AP2.4 aufbereitet.

III.2.2 AP 2.2: Technologieentwicklung in Erzeugung und Industrieanwendungen

Im AP 2.2 erfolgten Arbeiten zur Erfassung von technologischen Neuerungen und Entwicklungspotenzialen in Prozessen der Papier- und Zellstoffindustrie und deren Bewertung hinsichtlich der Transformationswirkung.

Die Arbeiten basieren auf einer kontinuierlichen Auswertung einschlägiger Studien, Roadmaps und Branchenpublikationen (3) (7) (8) sowie auf unternehmensspezifischen Pilotprojekten. Ziel war die Ableitung belastbarer Annahmen für zukünftige Effizienzsteigerungen, Energieträgerwechsel und strukturelle Veränderungen.

Die identifizierten Technologien wurden entlang der industriellen Prozesskette strukturiert und hinsichtlich ihres Einflusses auf Energiebedarf, Energieträgermix und Emissionsminderung eingeordnet. Dabei wurden sowohl kurzfristig realisierbare Effizienzmaßnahmen als auch mittelfristige Prozessinnovationen und langfristige disruptive Technologien berücksichtigt.

Parallel erfolgte eine systematische Einordnung externer Entwicklungen im Energiesystem, insbesondere im Hinblick auf Elektrifizierung, Nutzung erneuerbarer Energien, Biomasseeinsatz,



Wasserstoffintegration sowie Sektorenkopplung. Dadurch konnte die Industrieperspektive konsistent mit den Entwicklungen der Energieversorgung verknüpft werden.

Die Ergebnisse wurden in Form einer strukturierten Maßnahmenliste mit quantifizierten Wirkparametern (u. a. Einsparpotenziale, Technologiereifegrade, Implementierungszeiträume) aufbereitet. Ein PTS-interner Workshop diente der fachlichen Konsolidierung und Priorisierung der Maßnahmen.

Das Arbeitspaket liefert damit die technologische Grundlage für die Szenarienbildung und stellt sicher, dass diese auf realistischen und konsistent bewerteten Entwicklungspfaden basieren.

III.2.3 AP 2.3: Szenarienbildung: Erzeugungs- und Verbrauchssektoren

Im AP 2.3 erfolgten Arbeiten zur Prognose und Bewertung von potenziellen Szenarien zur Transformation der Zellstoff- und Papierindustrie in Bezug auf Energiebedarf, Produktionsentwicklung und Prozessumstellungen aufbauend auf den Ergebnissen der vorhergehenden Arbeitspakete mit dem Ziel einer quantitativen Beschreibung möglicher Entwicklungspfade hinsichtlich Energiebedarf, Energieträgerstruktur und Wasserstoffeinsatz bis 2050.

Kern der Arbeiten bildete die systematische Aggregation und Bewertung energiebezogener Einzelmaßnahmen. Diese wurden zunächst vollständig erfasst und anschließend zu konsistenten Maßnahmenclustern verdichtet, um Wechselwirkungen und Überschneidungen zu berücksichtigen sowie realistische Gesamtpotenziale abzubilden.

Die Szenarien wurden entlang klar definierter Zeithorizonte strukturiert: kurzfristige Entwicklungen auf Basis verfügbarer BAT-Maßnahmen, mittelfristige Entwicklungen durch weiterentwickelte Prozessführungen sowie langfristige Entwicklungen unter Einbezug disruptiver Technologien. Dieser Ansatz ermöglicht eine transparente und nachvollziehbare Fortschreibung des Energiebedarfs.

Die Ergebnisse zeigen, dass – abhängig von Prozessroute und Technologiedurchdringung – signifikante Energieeinsparungen von bis zu 80 % realisierbar sind. Gleichzeitig verdeutlichen sie die hohe Bandbreite möglicher Entwicklungen beim zukünftigen Energieträgereinsatz.

Die Szenarien wurden für das gewählte „best guess“-Szenario für die Weiterverwendung in der Modellierung aufbereitet.

III.2.4 AP 2.4: Techno-ökonomische Analyse der Infrastruktur

Im AP 2.4 erfolgten Arbeiten zur Aufbereitung der in den AP 2.1 bis AP 2.3 recherchierten und berechneten Daten zur Einbindung der Zellstoff- und Papierindustrie in die Simulationsmodelle des Projektpartners FFE.

Hierzu wurden die Datensätze aus AP 2.1 bis AP 2.3 strukturell harmonisiert, qualitätsgesichert und an die Anforderungen der Modellierung angepasst. Dies umfasste insbesondere die Vereinheitlichung von Prozessrouten, die Aggregation auf geeignete räumliche und sektorale Ebenen sowie die Ergänzung fehlender Parameter durch konsistente Abschätzungen.

Ein besonderer Fokus lag auf der Verknüpfung technischer und ökonomischer Parameter. Neben Energie- und Stoffströmen wurden – soweit verfügbar – Kosteninformationen für Rohstoffe, Produkte und



Prozesse integriert. Einschränkungen bestehen weiterhin bei der belastbaren Quantifizierung zukünftiger Investitionskosten für innovative Technologien.

Die aufbereiteten Daten umfassen sowohl den Status quo als auch projektierte Entwicklungen bis 2050 und ermöglichen damit eine integrierte techno-ökonomische Bewertung unterschiedlicher Transformationspfade.

Die Datenbereitstellung erfolgte iterativ und in enger Abstimmung mit der FfE, um eine konsistente und zielgerichtete Einbindung in die Modellierungsumgebung sicherzustellen. AP 2.4 übernahm damit eine zentrale Schnittstellenfunktion zwischen industrieller Detailanalyse und systemischer Energiemodellierung.

III.3 AP 4: Modellvergleich

Im AP 4 erfolgten planmäßig unterstützende Arbeiten zur Evaluierung des Infrastrukturmodells hinsichtlich der Aus- und Bewertung der Ergebnisse für die Zellstoff- und Papierindustrie.

III.4 AP 5: Nachhaltigkeitsbewertungen

Im AP 5 erfolgten planmäßig unterstützende Arbeiten für die Nachhaltigkeitsbewertungen in Bezug auf die Zellstoff- und Papierindustrie.

III.5 AP 6: Integration und Kommunikation

Im AP 6 erfolgten auf planmäßig unterstützende Arbeiten für Integrations- und Kommunikationstätigkeiten zur Stakeholdereinbindung in Bezug auf die Zellstoff- und Papierindustrie. Des Weiteren erfolgten Projekt- und Ergebnisvorstellungen auf Fachveranstaltungen für die Papierbranche sowie in Industriegremien der Papierindustrie (vgl. Tabelle 2 im Kapitel VIII).

III.6 AP 7: Roadmapping

Im AP 7 erfolgten planmäßig unterstützende Arbeiten bei der Erstellung einer Roadmap zur deutschen und europäischen Wasserstoffinfrastruktur. Des Weiteren erfolgten Projekt- und Ergebnisvorstellungen auf Fachveranstaltungen für die Papierbranche sowie in Industriegremien der Papierindustrie (vgl. Tabelle 2 im Kapitel VIII).

IV. Wesentliche Ergebnisse

Die nachfolgenden Ergebnisse fassen die wesentlichen Arbeitsergebnisse des Teilvorhabens der PTS im Arbeitspaket AP 2 zusammen. Im Fokus steht die Entwicklung einer konsistenten, modellierungsfähigen Datengrundlage sowie die systematische Analyse der energie- und prozesstechnischen Struktur der europäischen Zellstoff- und Papierindustrie. Darauf aufbauend wurden technologische Entwicklungspfade und Transformationszenarien abgeleitet sowie deren Auswirkungen auf den zukünftigen Energie- und Wasserstoffbedarf quantifiziert. Die Ergebnisse bilden die zentrale Schnittstelle zwischen industrieller Detailanalyse und der Energiesystemmodellierung im Verbundvorhaben TransHyDE-Systemanalyse.

IV.1 Aufbau einer konsistenten Datenbasis der europäischen Papierindustrie

Im Mittelpunkt des ersten Ergebnisblocks stand der Aufbau einer belastbaren, europaweit konsistenten Datenbasis zur Beschreibung der Zellstoff- und Papierindustrie. Ziel war die Schaffung einer strukturierten Datengrundlage, die sowohl die industrielle Realität abbildet als auch unmittelbar für die



Gefördert durch:



Energiesystemmodellierung im Rahmen der TransHyDE-Systemanalyse nutzbar ist. Hierzu wurden heterogene Datenquellen systematisch zusammengeführt, harmonisiert und hinsichtlich ihrer Modellkompatibilität aufbereitet.

Die Datenbasis umfasst eine detaillierte Erfassung von Produktionsstandorten innerhalb der EU27+3 einschließlich Kapazitäten, Prozessrouten, Produktsegmenten sowie Integrations- und Strukturmerkmalen. Insgesamt konnten rund 800 Standorte strukturiert abgebildet werden. Die Konsolidierung erfolgte auf Basis von BREF-Dokumenten, CEPI-Statistiken, spezialisierten Branchendatenbanken (u. a. Paper-World, Birkner) sowie ergänzenden Unternehmensinformationen.

Die resultierende Datenstruktur stellt eine einheitliche, konsistente Abbildung der europäischen Papierindustrie auf Prozessebene dar und bildet die zentrale Grundlage für alle weiteren Analyseschritte.

Die europäische Papier- und Zellstoffindustrie ist durch eine markante regionale Heterogenität sowie eine hohe Prozess- und Produktvielfalt geprägt. Im Zentrum der industriellen Wertschöpfung steht die Herstellung von Faserrohstoffen, die entweder primär aus Holz und Holzreststoffen (Zell- und Holzstoff) oder aus Sekundärrohstoffen aus der Aufbereitung von Altpapier gewonnen werden. Diese Faserrohstoffe bilden die Grundlage für die Papierproduktion, bei der unter Einsatz von Hilfsstoffen eine kontinuierliche Papierbahn in Papiermaschinen erzeugt wird.

Für das Basisjahr 2019 wurde Deutschland mit einer **Papierproduktion** von rund **22,1 Mio. t** als größter Produzent innerhalb der EU27+3 identifiziert. Die gesamte europäische Produktionsmenge lag bei **91,7 Mio. t**. Die Erzeugung primärer Faserrohstoffe betrug 2019 in der EU27+3 rund **38,2 Mio. t**, wobei die Schwerpunkte der Produktion in **Schweden (11,7 Mio. t)** und **Finnland (11,4 Mio. t)** lagen. Deutschland trägt hierzu mit rund **2,4 Mio. t** bei.

Die Standortanalyse zeigt eine europaweit dezentrale Struktur mit etwa **800 Produktionsstandorten**, wobei eine erhöhte Standortdichte insbesondere in Mitteleuropa festzustellen ist. Deutschland weist mit **144 Standorten** eine besonders hohe Konzentration auf (vgl. Abbildung 1). Diese räumliche

Verteilung ist wesentlich für die spätere Ableitung regional differenzierter Energie- und Wasserstoffbedarfe.

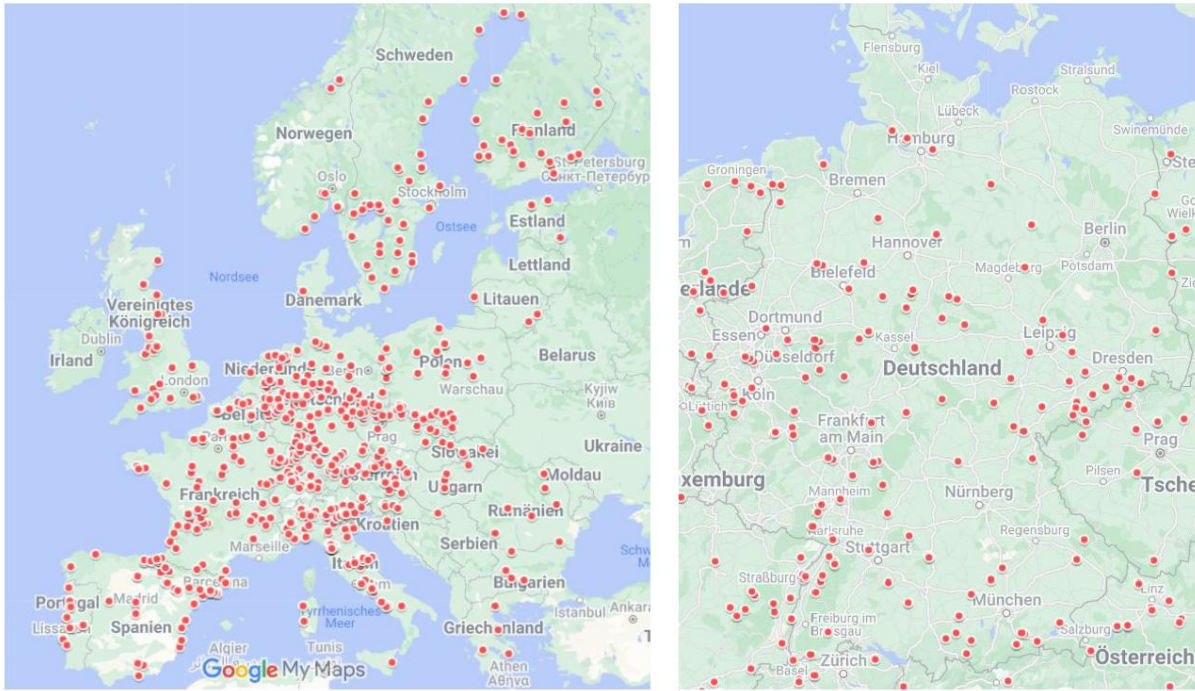


Abbildung 1: Eigene Darstellung der Standortverteilung der berücksichtigten Faserstoff- und Papier-Produktionsstätten. Kartenbasis: ©Google Maps. Datenbasis aus (6)

IV.2 Analyse der Energie- und Prozessstruktur der Industrie

Aufbauend auf der konsolidierten Datenbasis wurde die Energie- und Prozessstruktur der europäischen Papierindustrie detailliert analysiert. Ziel war die prozessscharfe Quantifizierung des Energieeinsatzes entlang der industriellen Wertschöpfungskette sowie die Identifikation struktureller Treiber des Energiebedarfs.

Die Analyse zeigt, dass der Energieverbrauch der Branche maßgeblich durch thermische Prozessschritte geprägt ist, insbesondere durch Trocknung, sowie durch die Stoffaufbereitung und den Papiermaschinenbetrieb. Gleichzeitig bestehen signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Prozessrouten und Produktsegmenten, die sich unmittelbar auf den spezifischen Energiebedarf auswirken.

Durch die Ableitung standardisierter Energiekennzahlen wurde eine konsistente Grundlage geschaffen, um Produktionsmengen in Energieverbräuche zu überführen und sektorale sowie regionale Aggregationen durchzuführen.

Die detaillierte Prozessanalyse zeigt, dass die Zellstoff- und Papierindustrie durch mehrere klar unterscheidbare Prozessketten geprägt ist:

(1) Zellstoff- und Holzstoffherzeugung, (2) Altpapieraufbereitung sowie (3) Papierherstellung in der Papiermaschine.

IV.2.1 Faserrohstoffherzeugung



Die Zellstoffproduktion erfolgt überwiegend aus Holz mittels chemischer Aufschlussverfahren (Sulfat- und Sulfidverfahren). Dabei werden etwa **50 % der Trockenmasse des Holzes im Prozess umgesetzt**, wobei insbesondere Lignin in Schwarzlauge überführt wird. Der Prozess ist energieintensiv und weist eine deutliche Wärmeabhängigkeit auf. Für die Zellstoffproduktion ergeben sich spezifische Energiekennwerte von:

- 588 kWh/t Strom
- 2.523 kWh/t Brennstoff

Im Sulfatverfahren werden rund **15 % des Brennstoffverbrauchs für den Kochprozess** und etwa **50 % für Trocknung und Entwässerung** benötigt. Der spezifische Gesamtenergieeinsatz liegt bei etwa **3.056 kWh/t**, im Sulfidverfahren bei bis zu **4.167 kWh/t**.

Die Holzstofferzeugung erfolgt hingegen primär mechanisch (SGW- und TMP-Verfahren) und ist deutlich stromdominiert. Hierbei ergeben sich:

- 2.107 kWh/t Strom
- 308 kWh/t Brennstoff

Beim TMP-Verfahren kann durch Wärmerückgewinnung ein signifikanter Anteil der Prozesswärme (bis zu **1.100 kWh/t**) intern genutzt werden. Insgesamt ist die Holzstoffproduktion in der Regel eng in Papierfabriken integriert, wodurch zusätzliche Trocknungsenergie entfällt.

IV.2.2 Papierherstellung

Die Papierproduktion basiert überwiegend auf Altpapier (**ca. 68 % Einsatzanteil in Deutschland 2019**), ergänzt durch Zellstoff (ca. 16 %) und Holzstoff (ca. 3 %). Die vier Hauptsortengruppen weisen unterschiedliche Energieprofile zur Herstellung auf:

- Grafische Papiere: 732 kWh/t Strom, 1.499 kWh/t Brennstoff
- Verpackungspapiere: 394 kWh/t Strom, 1.104 kWh/t Brennstoff
- Hygienepapiere: 876 kWh/t Strom, 1.618 kWh/t Brennstoff
- Spezialpapiere: 900 kWh/t Strom, 1.272 kWh/t Brennstoff

Die energieintensivsten Prozessschritte sind eindeutig die **Trocknung (Dampferzeugung)** sowie die mechanische Aufbereitung (Zerfaserung, Sortierung, Reinigung) in der Stoffaufbereitung. Insgesamt entfallen in der deutschen Papierindustrie rund **16 TWh Strom, 30 TWh Dampf** und **4 TWh Brennstoffe** auf die Papierherstellung.

IV.3 Technologieoptionen und Transformationspfade

Ein weiterer zentraler Ergebnisblock umfasst die systematische Identifikation, Strukturierung und Bewertung technologischer Optionen zur Dekarbonisierung der Zellstoff- und Papierindustrie. Ziel war die Ableitung belastbarer technologischer Entwicklungspfade unter Berücksichtigung unterschiedlicher Reifegrade und Transformationsgeschwindigkeiten.

Die Analyse umfasst ein breites Technologiespektrum von kurzfristig verfügbaren Effizienzmaßnahmen auf Basis etablierter BAT-Standards (Best available techniques) über mittelfristige Prozessinnovationen bis hin zu langfristig disruptiven Verfahren. Ergänzend wurden energiewirtschaftliche



Transformationsoptionen berücksichtigt, insbesondere Elektrifizierung, Wärmepumpeneinsatz, Nutzung biogener Reststoffe sowie der potenzielle Einsatz von Wasserstoff in thermischen Anwendungen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Dekarbonisierung der Branche nicht durch Einzeltechnologien, sondern nur durch kombinierte Technologiecluster erreichbar ist.

Die technologischen Optionen zur Dekarbonisierung der Branche adressieren gezielt die identifizierten energieintensiven Prozessschritte. Insbesondere die Trocknungsprozesse in der Papiermaschine sowie die thermischen Schritte in der Zellstoffproduktion sind zentrale Transformationshebel.

Auf Basis der Prozessanalyse ergeben sich folgende prioritäre Transformationsansätze:

- Elektrifizierung thermischer Prozesse, insbesondere der Trocknung
- Einsatz von elektrischen Dampfkesseln mit Wirkungsgraden bis zu 98 %
- Nutzung von Wärmepumpen zur Aufwertung industrieller Niedertemperaturabwärme
- Substitution fossiler Brennstoffe durch **Wasserstoff und biogene Reststoffe**
- verstärkte Wärmerückgewinnung insbesondere aus TMP-Prozessen
- langfristige Nutzung von CO₂-Abscheidungstechnologien

Die Analyse zeigt zudem, dass insbesondere die Kombination aus Prozessintegration (z. B. integrierte Holzstofferzeugung) und Energieeffizienzmaßnahmen eine zentrale Voraussetzung für die Transformation ist.

IV.4 Entwicklung konsistenter Transformationsszenarien

Auf Basis der Daten- und Technologieanalyse wurden konsistente, quantitativ belastbare Szenarien zur Transformation der Industrie bis 2050 entwickelt. Ziel war die Abbildung des Spannungsraums möglicher Entwicklungen hinsichtlich Produktionsstruktur, Energiebedarf und Energieträgereinsatz.

Die Szenarien verknüpfen Produktionsentwicklung, Technologieeinführung und Energieverbrauch in einem integrierten Modellierungsansatz. Dabei wurde insbesondere zwischen einem eher elektrifizierungsgetriebenen Entwicklungspfad und einem wasserstoffzentrierten Maximalpfad differenziert.

Die Szenarienstruktur ermöglicht eine transparente Bewertung unterschiedlicher Transformationsgeschwindigkeiten sowie der daraus resultierenden Systemwirkungen.

Ein Bestandteil der Szenarienbildung war die Ableitung der Produktionsmengenentwicklung der verschiedenen Prozessrouten im Zeitraum von 2019 bis 2050 (vgl. Abbildung 2). Die Abbildung verdeutlicht die unterschiedlichen Entwicklungspfade der Prozessrouten sowie deren Beitrag zur Gesamtproduktion und zeigt die Bandbreite möglicher struktureller Verschiebungen innerhalb der Branche.

Bei der Herleitung der Produktionsszenarien wurden sowohl historische Entwicklungen als auch strukturelle Veränderungen auf der Nachfrageseite einbezogen. Die Trends der vergangenen Jahre weisen



in vielen Segmenten auf eine Stagnation oder einen leichten Rückgang klassischer grafischer Papiere hin, während Verpackungs- und Spezialpapiere stabilere oder wachsende Entwicklungen zeigen.

Zusätzlich wurden folgende Einflussfaktoren systematisch berücksichtigt:

Fortschreitende Digitalisierung:

Substitution papierbasierter Anwendungen, insbesondere im Bereich grafischer Papiere, führt langfristig zu einer strukturellen Verschiebung der Produktionsmengen.

Einführung von Mehrwegquoten:

Regulatorische Eingriffe zur Reduktion von Einwegverpackungen können die Nachfrage nach bestimmten Papierprodukten dämpfen oder strukturell verändern.

Ressourcenschonung:

Effizienzsteigerungen, Kreislaufwirtschaft und Materialeinsparungen wirken tendenziell mengenreduzierend, bei gleichzeitig steigenden Anforderungen an Produktqualität.

Sinkende Grammaturen und Designoptimierung:

Technologische Fortschritte ermöglichen leichtere Produkte bei gleicher Funktionalität, was zu einem Rückgang der Produktionsmengen bei gleichbleibender Nutzleistung führt.

Neue Verfahren abseits klassischer Papierproduktion:

Innovative, faserbasierte Materialien und alternative Produktionsprozesse können sowohl substitutive als auch zusätzliche Nachfrageeffekte erzeugen.

Politische Zielsetzungen vs. Brancheneinschätzungen:

Die Szenarien berücksichtigen Spannungsfelder zwischen politischen Ambitionsniveaus und Markteinschätzungen zentraler Akteure und Studien (u. a. IG BCE, Cepi, PTS, UPM/Smithers) sowie den tatsächlich beobachteten Trends der Vergangenheit.

Insgesamt zeigt die Analyse, dass die zukünftige Produktionsentwicklung mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist und stark von regulatorischen Rahmenbedingungen, technologischen Innovationen sowie Veränderungen im Konsumverhalten abhängt. Diese Unsicherheiten werden in den Szenarien

durch eine entsprechende Bandbreite an Entwicklungspfaden abgebildet und sind maßgeblich für die Bewertung der Transformationsoptionen.

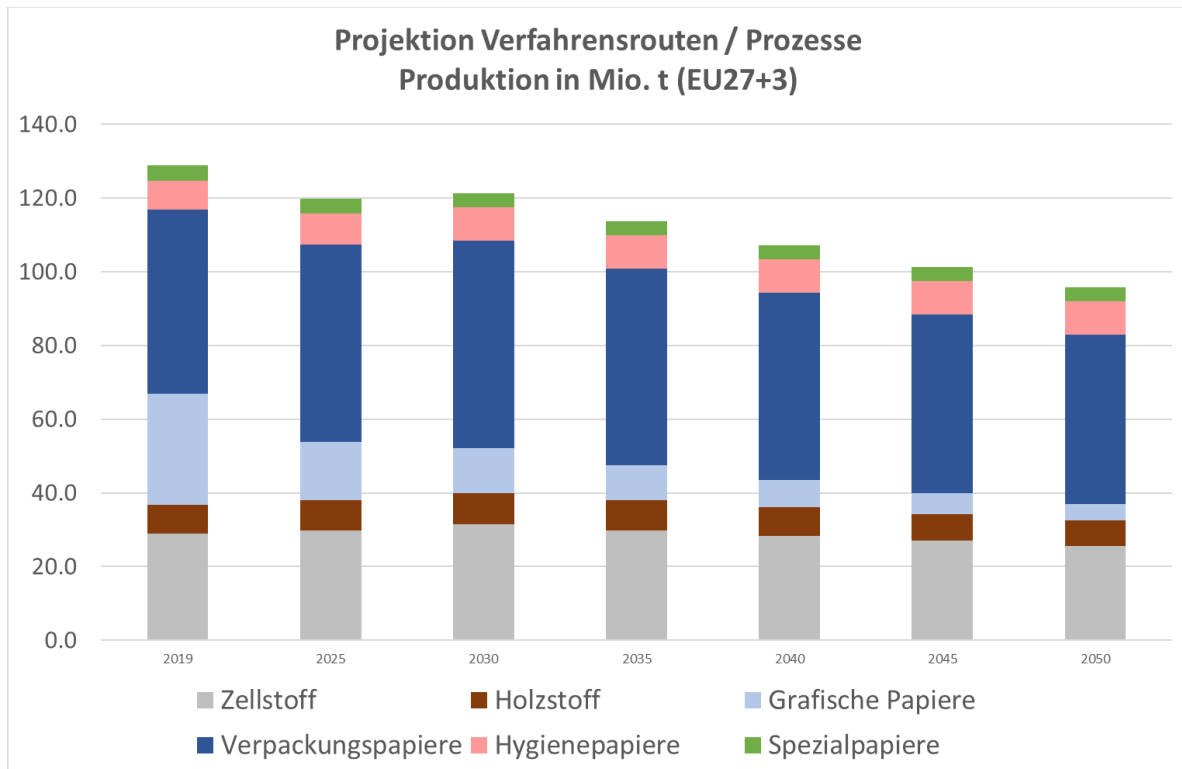


Abbildung 2: Abgeschätzte Produktionsmengenentwicklung der verschiedenen Prozessrouten der Zellstoff- und Papierindustrie in der EU27+3 von 2019 bis 2050

IV.5 Wasserstoffbedarf und Einordnung in bestehende Studien

Ein zentrales Ergebnis der Szenarienanalyse ist die quantitative Ableitung des zukünftigen Wasserstoffbedarfs der Papierindustrie. Dieser wurde basierend auf den Systemmodellierungen bestimmt und in bestehende wissenschaftliche und industriebezogene Studien eingeordnet.

Die Ergebnisse zeigen eine plausible Größenordnung im Vergleich zu Literaturwerten, jedoch zugleich eine erhebliche Spannweite, die insbesondere aus Unsicherheiten hinsichtlich Technologieverfügbarkeit, Infrastrukturentwicklung und industrieller Umsetzungsgeschwindigkeit resultiert.

Die Einordnung verdeutlicht die Relevanz der Branche als potenzieller industrieller Abnehmer im zukünftigen Wasserstoffsystem, jedoch mit stark szenarienabhängiger Ausprägung.

Die Analyse der Transformationsszenarien zeigt, dass insbesondere die thermischen Prozesse der Zellstoff- und Papierindustrie potenziell relevante, jedoch insgesamt begrenzte Wasserstoffabnehmer darstellen. Der modellierte Wasserstoffbedarf der Branche ergibt sich im Wesentlichen aus der Substitution fossiler Brennstoffe in der Dampferzeugung für die Trocknungsprozesse der Papiermaschine sowie in ausgewählten Hochtemperaturanwendungen.

Für die Papierindustrie in Deutschland wurde im Rahmen der Systemmodellierung ein **Wasserstoffbedarf von rund 8 TWh** ermittelt. Dieser Wert liegt im mittleren Bereich bestehender Studien und



bestätigt die robuste Größenordnung der Ergebnisse: Während konservative Abschätzungen (9) von etwa **2–3 TWh** ausgehen, weisen industrietriebebene Szenarien (4) deutlich höhere Werte von **15–20 TWh** aus.

Die Einordnung in den europäischen Gesamtkontext zeigt eine deutlich größere Skalierung der Wasserstoffnachfrage. Für Europa wird eine kontinuierliche Steigerung der Wasserstoffnachfrage von **289 TWh im Jahr 2030 auf 1.841 TWh im Jahr 2050** prognostiziert. Für Deutschland ergibt sich ein Anstieg von **53 TWh auf 305 TWh im gleichen Zeitraum**. Die sektorale Verteilung im Jahr 2050 zeigt dabei eine dominierende Nutzung im **Industriesektor (40 %)**, gefolgt von **Verkehr und Energiesektor (25 %)** sowie dem **Gebäudesektor (10 %)**.

Im Vergleich zu diesen gesamtwirtschaftlichen Entwicklungen ist der Beitrag der Papierindustrie quantitativ begrenzt, jedoch systemisch relevant, insbesondere aufgrund ihrer hohen kontinuierlichen Lastprofile und der Nähe zu zentralen industriellen H₂-Infrastrukturen. Die Ergebnisse verdeutlichen damit, dass die Branche zwar keinen dominierende, aber eine stabile und planbare industrielle Wasserstoffnachfrage im zukünftigen Energiesystem erwarten lässt.

IV.6 Herausforderungen der industriellen Transformation

Die Analyse der Transformationspfade zeigt, dass die Umsetzung der identifizierten Technologien und Szenarien durch eine Reihe struktureller und technischer Hemmnisse geprägt ist. Besonders relevant sind die hohe Prozessintegration der Branche, kontinuierliche Produktionsbedingungen sowie begrenzte Substitutionsmöglichkeiten einzelner energieintensiver Prozessschritte.

Zusätzlich wirken infrastrukturelle Rahmenbedingungen – insbesondere Verfügbarkeit von Strom, Wasserstoff und Wärmeinfrastruktur – sowie wirtschaftliche Unsicherheiten als zentrale Einflussfaktoren auf die Umsetzungsdynamik. Diese Faktoren bestimmen maßgeblich die Realisierbarkeit und zeitliche Abfolge der Transformation.

Die strukturelle Analyse zeigt mehrere branchenspezifische Restriktionen:

- kontinuierlicher 24/7-Betrieb (ca. 8.100 h/Jahr) begrenzt Flexibilität im Energiesystem
- sehr hohe Prozessintegration insbesondere bei TMP- und integrierten Standorten
- lange Anlagenlebensdauern von **bis zu 50 Jahren**
- hoher Anteil thermischer Prozesse mit derzeit begrenzter Substituierbarkeit

Zusätzlich zeigen die Ergebnisse, dass insbesondere Trocknungsprozesse einen systemischen Engpass darstellen, da sie sowohl energetisch dominant als auch technologisch nur eingeschränkt substituierbar sind.

Darüber hinaus bestimmen externe Rahmenbedingungen maßgeblich die Realisierbarkeit und zeitliche Abfolge der Transformation (8):

- **Verfügbarkeit klimaneutraler Energieträger:**
Erforderlich ist eine langfristig gesicherte und stabile Versorgung mit erneuerbarem Strom, nachhaltigen Festbrennstoffen sowie grünen Gasen. Insbesondere der Hochlauf internationaler Wasserstoffmärkte und entsprechender Importkapazitäten sind hierfür entscheidend.
- **Infrastruktur:**
Die Transformation setzt eine umfassende Erweiterung der Stromnetze sowie den Aufbau einer leistungsfähigen Wasserstoffinfrastruktur voraus. Dazu gehören sowohl H₂-Transport- als



auch Verteilnetze, die perspektivisch eine vergleichbare Rolle wie bestehende Erdgasnetze einnehmen müssen.

- **Volatilität erneuerbarer Energien:**
Schwankungen in der Verfügbarkeit von Wind- und Solarenergie stellen eine zentrale Herausforderung dar. Für eine stabile Versorgung sind flexible Ausgleichsoptionen, Speicherlösungen und sektorübergreifende Kopplungen erforderlich, insbesondere zur Überbrückung von Dunkelflauten.
- **Wirtschaftlichkeit:**
Die Sicherstellung wettbewerbsfähiger Energiekosten ist eine Grundvoraussetzung für die Transformation. Ohne geeignete Rahmenbedingungen besteht das Risiko von Produktionsverlagerungen in Regionen mit niedrigeren Energiepreisen.
- **Technische Machbarkeit:**
Die Entwicklung und Integration neuer Technologien muss auf die spezifischen Anforderungen der Papierproduktion abgestimmt sein. Gleichzeitig ergeben sich erhebliche Herausforderungen bei der Einbindung dieser Technologien in bestehende, hochintegrierte Produktionssysteme.

Insgesamt zeigt sich, dass die Transformation der Papierindustrie nicht allein eine technologische Herausforderung darstellt, sondern in hohem Maße von infrastrukturellen, wirtschaftlichen und systemischen Entwicklungen abhängt. Diese Faktoren wirken zusammen und bestimmen sowohl die Geschwindigkeit als auch die Umsetzbarkeit der Transformationspfade.

IV.7 Datenaufbereitung für die Energiesystemmodellierung

Ein wesentlicher Ergebnisbaustein ist die strukturierte Aufbereitung aller erhobenen Daten für die Integration in die Energiesystemmodelle des Projektpartners FfE. Ziel war die Überführung der industriellen Detailinformationen in eine konsistente, modellkompatible Struktur.

Hierzu wurden Energie-, Stoffstrom- und Produktionsdaten harmonisiert, aggregiert und auf die Anforderungen der Modellierung angepasst. Dies umfasste insbesondere die Vereinheitlichung von Prozessrouten, die räumliche Aggregation sowie die Ergänzung fehlender Parameter durch konsistente Annahmen und Plausibilisierungen.

Die Datenbereitstellung bildet die zentrale Schnittstelle zwischen industrieller Detailanalyse und systemischer Energiesystemmodellierung.

Ein wesentlicher Ergebnisbaustein ist die strukturierte Aufbereitung aller erhobenen Daten für die Integration in die Energiesystemmodelle des Projektpartners FfE. Ziel war die Überführung der industriellen Detailinformationen in eine konsistente, modellkompatible Struktur, die sowohl standort- als auch prozessscharfe Analysen ermöglicht.

Die Datengrundlage umfasst insgesamt etwa **800 Standortdatensätze** mit einer aggregierten **Gesamtkapazität von 132,629 Mio. Tonnen pro Jahr**. Jeder Standort wurde dabei einer klar definierten



Unterbranche zugeordnet, um eine differenzierte Abbildung der industriellen Struktur zu gewährleisten. Berücksichtigt wurden hierbei:

- Zellstoffherstellung (Chemical pulp)
- Holzstoffherstellung (Mechanical pulp)
- Papierherstellung grafisch (Graphic paper)
- Papierherstellung Verpackung (Packaging paper)
- Papierherstellung Hygiene (Tissue paper)
- Papierherstellung Spezial (Special paper)

Diese Unterteilung bildet die Grundlage für eine prozessscharfe Abbildung der energie- und stoffstrombezogenen Unterschiede innerhalb der Branche und ermöglicht eine konsistente Verknüpfung von Produktionsstrukturen und Energiebedarf.

Auf Basis der Standort- und Produktionsdaten wurde zudem ein **Forecast der Produktionsmengen bis 2050** je Unterbranche und Land entwickelt. Dieser basiert auf einem konsistenten Set aus Annahmen, Trendfortschreibungen und Risikofaktoren und bildet mögliche strukturelle Verschiebungen innerhalb der europäischen Papierindustrie ab. Dadurch können sowohl Nachfragedynamiken als auch regionale Produktionsverlagerungen im Modell abgebildet werden.

Ein weiterer zentraler Bestandteil der Datenaufbereitung betrifft die energetische Charakterisierung der Prozessrouten. Hierzu wurden detaillierte Angaben zum Strom- und Brennstoffverbrauch sowie zur Brennstoffaufteilung für sechs zentrale Prozessrouten der Zellstoff- und Papierindustrie harmonisiert und in eine einheitliche Modellstruktur überführt. Dies erlaubt eine konsistente Abbildung der branchenspezifischen Energieflüsse auf Prozessebene.

Ergänzend wurden Informationen zu den **eingesetzten Thermoprozessanlagen** erfasst und modellseitig berücksichtigt. Ein besonderer Fokus lag hierbei auf der **Direktbefeuerung in der Papiermaschine**, insbesondere in den Trocknungsprozessen, die einen wesentlichen Anteil am fossilen Energieeinsatz der Branche darstellen. Diese Prozesse wurden separat in der Modellstruktur abgebildet, um deren Dekarbonisierungspotenzial gezielt bewerten zu können.

Darüber hinaus wurden Transformationsmaßnahmen systematisch erfasst, bewertet und in die Datenstruktur integriert. Für jede Maßnahme erfolgte eine Bewertung entlang der Dimensionen:

- Umsetzungszeitraum (kurz-, mittel- und langfristig)
- Anwendungsfaktor (technisches und industrielles Einsatzpotenzial)
- Einsparpotenzial für Strom und Brennstoffe

Diese strukturierte Bewertung ermöglicht eine konsistente Abbildung von Transformationspfaden innerhalb der Energiesystemmodellierung und erlaubt die quantitative Ableitung sektoraler Dekarbonisierungspfade.

Die gesamte Datenaufbereitung stellt damit eine zentrale Schnittstelle zwischen der detaillierten industriellen Prozessanalyse und der Energiesystemmodellierung dar. Sie gewährleistet, dass sowohl



Gefördert durch:



heutige Strukturen als auch zukünftige Entwicklungen der Branche in konsistenter, quantifizierter und modelltechnisch nutzbarer Form abgebildet werden können.

IV.8 Gesamtbewertung und Systembeitrag

Insgesamt leisten die Arbeiten der PTS einen wesentlichen Beitrag zur systemischen Integration der Zellstoff- und Papierindustrie in die Transformationsanalyse des Energiesystems. Durch die Verknüpfung von detaillierter Industriebeschreibung, technologischer Bewertung und Szenarienentwicklung wurde eine belastbare Grundlage für die Abbildung der Branche in nationalen und europäischen Energiesystemmodellen geschaffen.

Die Ergebnisse ermöglichen eine konsistente Bewertung von Transformationspfaden, Energiebedarfen und Infrastrukturanforderungen und stellen damit einen zentralen Baustein für die Weiterentwicklung der Roadmap im Verbundvorhaben TransHyDE-Systemanalyse dar.

V. Verwendung der Zuwendung

V.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Teilvorhaben der PTS wurde vollständig bearbeitet. Die Projektkosten setzten sich fast ausschließlich aus Personalkosten und Reisekosten für Projektveranstaltungen zusammen. Die bewilligten Mittel wurden vollständig im beantragten Umfang zweckgebunden eingesetzt.

Die PTS rechnet die vom Bundesministerium erhaltenen Fördermittel und seine Selbstkosten für das Projekt im Rahmen einer separaten Berichterstattung einzeln mit dem Projektträger Jülich ab. Der zahlenmäßige Nachweis ist daher nicht Bestandteil des Sachberichtes.

V.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die PTS – Institut für Fasern und Papier gGmbH ist eine gemeinnützige Forschungseinrichtung der deutschen Papierindustrie, die Unternehmen der papiererzeugenden, verarbeitenden als auch anderen Branchen bei der Entwicklung und Anwendung von faserbasierten Lösungen unterstützt. Die Finanzierung der PTS erfolgt weitestgehend aus Drittmitteln öffentlicher Fördermittelgeber. Es lag kein Eigeninteresse der PTS vor. Nutznießer der Ergebnisse ist die Politik sowie die Allgemeinheit, die über Anschlussprojekte und den dadurch bewirkten Wissenstransfer von den Projektergebnissen profitiert sowie die Wissenschaft. Eigene kommerzielle Produkte wurden nicht angestrebt. Das Verbundvorhaben war ohne Förderung nicht realisierbar, da die erforderlichen finanziellen Ressourcen von der PTS und den Projektpartnern nicht aus Eigenmitteln bereitgestellt werden konnten.

Passfähige Förderbekanntmachungen auf europäischer Ebene waren den Projektpartnern zum Zeitpunkt der Antragsstellung nicht bekannt. Insbesondere bot die Europäische Kommission kein Programm, das annähernd dieselbe Bandbreite an Anwendungen, Technologien und analytischen Untersuchungen fördert. Auch auf Ebene der übrigen Bundesministerien waren keine Programme bekannt, die eine derart umfassende Analyse der Transformation des Energiesystems hin zu einer Wasserstoffwirtschaft auf den drei Ebenen der Erzeugung, der Verwendung und des Transports für Deutschland erlauben.

Die Hauptaufgaben der PTS waren dabei von zentraler Bedeutung, da für die Zellstoff- und Papierindustrie bislang keine ausreichend konsistente und modellierungsfähige Datengrundlage zur Beschreibung von Energiebedarf, Prozessstrukturen und Transformationsoptionen auf europäischer Ebene vorlag. Insbesondere die Kombination aus standortspezifischer Datenerhebung, prozessscharfer



Gefördert durch:



Energieanalyse und der systematischen Bewertung technologischer Entwicklungspfade stellt einen wesentlichen Mehrwert des Vorhabens dar. Erst durch diese Arbeiten konnte eine belastbare Verknüpfung zwischen industrieller Realität und den Anforderungen der Energiesystemmodellierung hergestellt werden.

Für die Simulationsmodellarbeiten im Verbundprojekt war die durch die PTS bereitgestellte Datentiefe und -struktur entscheidend, da nur so realitätsnahe Szenarien zur zukünftigen Entwicklung von Energiebedarf und Wasserstoffeinsatz abgebildet werden konnten. Ohne diese branchenspezifische Aufbereitung wären die Besonderheiten der Papier- und Zellstoffindustrie – insbesondere die hohe Prozessintegration, die differenzierten Prozessrouten sowie die spezifischen Optionen zur Defossilisierung – in der Modellierung nicht adäquat berücksichtigt worden. Die Arbeiten der PTS waren somit eine notwendige Voraussetzung, um belastbare Aussagen zur Rolle der Branche im zukünftigen Energiesystem und zu den daraus resultierenden Infrastrukturbedarfen treffen zu können.

Die aufgeführten Arbeiten waren im beantragten Umfang zur Erreichung des Forschungszieles notwendig und angemessen. Die Arbeiten im Projekt folgten dem beantragten und genehmigten Arbeitsplan. Aufgrund der rückwirkenden Bewilligung des Projektes und dem dadurch abweichend von dem zum 01.04.2021 ursprünglich geplanten Projektstart konnten einzelne Meilensteine im AP 2 erst später erreicht werden, was im späteren Projektverlauf allerdings keine Auswirkungen auf nachfolgende Arbeitsschritte hatte, da diese teilweise parallel bearbeitet wurden.

VI. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans

Die im Teilvorhaben der PTS erarbeiteten Ergebnisse leisten einen wesentlichen Beitrag zum systemischen Verständnis der Transformationspfade der Zellstoff- und Papierindustrie hin zu einer klimaneutralen Energieversorgung. Als gemeinnützige Forschungseinrichtung verfolgt die PTS keine unmittelbare wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse. Vielmehr stehen die Generierung, Aufbereitung und der Transfer von wissenschaftlich fundiertem Wissen in die Industrie, Forschung und Öffentlichkeit im Vordergrund.

Die erarbeiteten Datensätze, Szenarien und Analysen stellen eine belastbare Grundlage für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dar. Insbesondere die konsistente Verknüpfung von industriellen Transformationspfaden mit Anforderungen an die Energie- und Wasserstoffinfrastruktur ermöglicht eine fundierte Einordnung der Rolle von grünem Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem. Diese Ergebnisse können von Industrieunternehmen, Verbänden und politischen Entscheidungsträgern als Entscheidungsgrundlage für strategische Investitionen, Infrastrukturplanung sowie regulatorische Rahmenbedingungen genutzt werden.

Ein zentraler Nutzen liegt in der Bereitstellung einer modellierungsfähigen und anschlussfähigen Datengrundlage, die sowohl im Verbundprojekt als auch in zukünftigen Forschungsvorhaben weiterverwendet werden kann. Die Ergebnisse können zukünftig zudem in Roadmaps, Studien und Positionspapiere einfließen und so die strukturierte Weiterentwicklung der Branche im Kontext der industriellen Transformation unterstützen.

Darüber hinaus tragen die Arbeiten zur Stärkung der wissenschaftlichen Kompetenz der PTS im Bereich der energieintensiven Industrien und der Wasserstoffsystemanalyse bei. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in Form von Fachpublikationen, Vorträgen sowie im Rahmen von Netzwerkaktivitäten verbreitet und stehen damit einem breiten Nutzerkreis zur Verfügung. Sie bilden gleichzeitig eine



Leitprojekt
TransHyDE

Gefördert durch:



wichtige Grundlage für die Initiierung und Bearbeitung zukünftiger nationaler und internationaler Forschungsprojekte.

Indirekte wirtschaftliche Effekte ergeben sich mittel- bis langfristig durch die Nutzung der Projektergebnisse in der Industrie. Insbesondere können die entwickelten Szenarien und Analysen Unternehmen der Zellstoff- und Papierindustrie bei der Bewertung von Transformationsoptionen sowie bei Investitionsentscheidungen hinsichtlich Energieversorgung, Elektrifizierung und Wasserstoffeinsatz unterstützen. Dies kann zur Förderung einer nachhaltigen und wettbewerbsfähigen Entwicklung der Branche beitragen.

Die Anmeldung eigener Patente oder Schutzrechte wurden im Rahmen des Vorhabens weder angestrebt noch sind solche zu erwarten. Einschränkungen hinsichtlich der wissenschaftlichen und technischen Verwertbarkeit der Ergebnisse sind nicht erkennbar.

VII. Fortschritt des Projektumfelds während der Laufzeit

Während der Projektlaufzeit haben sich sowohl die strategischen Rahmenbedingungen als auch die branchenspezifischen Entwicklungen im Kontext der industriellen Transformation und der Wasserstoffwirtschaft dynamisch weiterentwickelt.

Ein wesentlicher Fortschritt besteht in der Weiterentwicklung strategischer Leitbilder und Roadmaps für die Industrie. Hervorzuheben ist insbesondere die neue Roadmap der Modellfabrik aus dem Jahr 2023, die unter Mitwirkung der PTS erarbeitet wurde. Diese konkretisiert technologische Transformationspfade für eine klimaneutrale Papierproduktion und integriert aktuelle technologische Entwicklungen sowie energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen. Die Ergebnisse des Projekts konnten hierbei teilweise einfließen bzw. wurden parallel gespiegelt und validiert. (7)

Darüber hinaus wurde im Jahr 2024 eine umfassende Klimastudie durch das DPI unter Beteiligung der PTS veröffentlicht. Diese liefert vertiefte Analysen zu Emissionsminderungsoptionen und Transformationsstrategien der Branche und stellt damit eine wichtige Ergänzung und Validierung der im Projekt entwickelten Szenarien dar. (8)

Parallel dazu ist eine zunehmende Anzahl konkreter Transformationsprojekte in der Zellstoff- und Papierindustrie zu beobachten. Viele Unternehmen treiben aktiv Maßnahmen zur Dekarbonisierung voran, wobei neben Elektrifizierung und Effizienzsteigerungen auch der Einsatz von Wasserstoff zunehmend in den Fokus rückt. Erste Pilot- und Demonstrationsvorhaben sowie konzeptionelle Planungen zeigen, dass Wasserstoff insbesondere für Hochtemperaturprozesse (wie bspw. die direkte Befeuerung zur Trocknung bei Hygienepapieren) und als flexible Ergänzung zu anderen Energieträgern eine potenzielle Rolle einnehmen kann.

Gleichzeitig ist festzustellen, dass die tatsächliche Entwicklung der Transformationspfade weiterhin mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Insbesondere wirtschaftliche Rahmenbedingungen, Energiepreise, regulatorische Vorgaben sowie die Verfügbarkeit von Wasserstoffinfrastruktur beeinflussen maßgeblich die Geschwindigkeit und Ausgestaltung der Umsetzung in der Industrie.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass sich das Projektumfeld im Sinne einer zunehmenden Konkretisierung und Operationalisierung von Transformationsstrategien weiterentwickelt hat. Die im Projekt

erarbeiteten Ergebnisse stehen somit in einem engen Wechselverhältnis zu aktuellen Entwicklungen in der Branche und tragen dazu bei, diese systemisch einzuordnen und wissenschaftlich zu fundieren.

VIII. Erfolgte Veröffentlichungen

Im Rahmen der Arbeiten zur Kommunikation von Projektergebnissen und -erkenntnissen im AP 6 und zum Roadmapping im AP 7 wurden das Projekt TransHyDE-Sys sowie Teilergebnisse auf zwei Fachveranstaltungen der Papierbranche vorgestellt (10) (11). Zudem wurden im Rahmen der Arbeiten im AP 2 zur Infrastrukturentwicklung ein zweiteiliges White Paper zum Thema der industriellen Transformation in den untersuchten Branchen erstellt und veröffentlicht (12) (13). Des Weiteren sind durch die PTS erhobene Daten zur Papierbranche als Grundlage in weitere Publikationen eingeflossen, bspw. (14) (15). Eine weitere Veröffentlichung im Branchenmagazin Wochenblatt für Papierfabrikation ist nach Projektabschluss geplant.

Table 2: Erfolgte Veröffentlichungen

Datum	Art der Veröffentlichung	Titel	Autoren
10.11.2022	Vortrag auf PTS-Fachtagung: Paper for Power	Nationales Leitprojekt TransHyDE Defossilisierung der Papier- und Zellstoffindustrie (10)	Schiefer, M.
24.10.2025	Vortrag auf Symposium der Papieringenieure: KLARTEXT DEFOSSILISIERUNG. Chancen und Herausforderungen für die Zellstoff- und Papierindustrie	Strategien zur Energiedefossilisierung – Erkenntnisse aus dem nationalen Leitprojekt TransHyDE (11)	Schiefer, M.
18.12.2025	Whitepaper, abrufbar unter https://www.wasserstoff-leitprojekte.de	Grundstoffindustrie im Wandel – Branchensteckbriefe (12)	Much, M. et al.
18.12.2025	Whitepaper, abrufbar unter https://www.wasserstoff-leitprojekte.de	Grundstoffindustrie im Wandel – Die industrielle Transformation in Zeiten der Energiewende (13)	Much, M. et al.
Q2/Q3 2026 geplant	Artikel im Wochenblatt Papierfabrikation	Arbeitstitel: Strategien zur Energiedefossilisierung – Erkenntnisse aus dem nationalen Leitprojekt TransHyDE	Schiefer, M.



Literaturverzeichnis

1. **CEPI - Confederation of European Paper Industries.** The Forest Fibre Industry – 2050 Roadmap to a low-carbon bio-economy. Brüssel : s.n., 2011. https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2020/08/2050_roadmap_final.pdf.
2. **Industries, CEPI - Confederation of European Paper.** Two Team Project. Brüssel : s.n., 2013.
3. **M. Suhr et al.** Best available techniques (BAT) reference document for the production of pulp, paper and board. *industrial emissions directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control)*. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2015. Bd. no.27235.
4. **VDP -Verband Deutscher Papierfabriken e.V.** VDP-Leistungsbericht PAPIER 2021. Bonn : s.n., 2021. <https://www.papierindustrie.de/papierindustrie/statistik>.
5. **CEPI - Confederation of European Paper Industries.** KEY STATISTICS 2020 – European pulp & paper industry. Brüssel : Online, 2021. <https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2021/07/Key-Stats-2020-FINAL.pdf>.
6. **Birkner's PAPER World.** Digitale Firmen – Datenbank der internationalen Papierindustrie. s.l. : Online. <https://www.paper-world.com/de/branchenbuch/firmen-datenbank>.
7. **Modellfabrik Papier gGmbH.** Roadmap Modellfabrik Papier. Düren : Online, 2023. <https://www.fibers-in-process.de/news/media/10/Modellfabrik-Papier-Roadmap-92022.pdf>.
8. **Die Papierindustrie e.V.** KLIMASTUDIE PAPIERINDUSTRIE – Transformation zur Klimaneutralität. Bonn : Online, 2024. <https://www.papierindustrie-transformation.de/transformation>.
9. **Heilmaier, Philipp.** Wasserstoff - Treibstoff für die Industrie? s.l. : DEA - Deutsche Energie Agentur, 13.09.2022. PAPER-BRIEFING vom DPI.
10. **Schiefer, M.** Nationales Leitprojekt TransHyDE Defossilisierung der Papier- und Zellstoffindustrie. *PTS-Fachtagung: Paper for Power*. Dresden : s.n., 10.11.2022.
11. —. Strategien zur Energiedefossilisierung – Erkenntnisse aus dem nationalem Leitprojekt TransHyDE. *Symposium der Papieringenieure: KLARTEXT DEFOSSILISIERUNG. Chancen und Herausforderungen für die Zellstoff- und Papierindustri*. Leipzig : s.n., 24.10.2025.
12. **Much, M. et al.** Grundstoffindustrie im Wandel - Branchensteckbriefe. s.l. : Online, 18.12.2025. https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/5581000d-db64-11f0-b7c5-fa163ed847d2/live/document/Grundstoffindustrie_im_Wandel_%E2%80%93_Branchensteckbriefe_final.pdf.
13. —. Grundstoffindustrie im Wandel - Die industrielle Transformation in Zeiten der Energiewende. s.l. : Online, 18.12.2025. https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/42bf430a-db5f-11f0-b7c5-fa163ed847d2/live/document/Grundstoffindustrie_im_Wandel_3.pdf.
14. **Ausfelder, F. et al.** European Hydrogen Infrastructure - Insights from the TransHyDE Project System Analysis. s.l. : Online, 03/2024. https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/148FFEF003673B67E0637E695E8625E5/live/document/20240321_European_Hydrogen_Infrastructure_Planning.pdf.
15. —. European Hydrogen Infrastructure Planning - Latest Insights from TransHyDE System Analysis. s.l. : Online, 11/2025. https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/b72ece03-cb97-11f0-ad78-fa163ebab5e5/live/document/TransHyDE-Sys_Flagship_Pub_2.0_final.pdf.