



Forschungsprojekt SustainTool

# Leitfaden zur nachhaltigen Werkzeugherstellung

**2025**

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Boos

Jonas Kenfenheuer, M. Sc.

Leonhard Klisch, M. Sc.

Helen Baumert, M. Sc.



# Inhaltsverzeichnis

<b>SustainTool – Werkzeugbau als Motor der Nachhaltigkeit .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Nachhaltigkeit als Erfolgsfaktor in der Werkzeugherstellung .....</b>	<b>2</b>
<b>2 Methodisches Vorgehen und Forschungsdesign .....</b>	<b>4</b>
<b>3 Systematische Prozessanalyse der Werkzeugherstellung .....</b>	<b>5</b>
<b>4 Nachhaltigkeitsmaßnahmen entlang der Prozesskette .....</b>	<b>6</b>
4.1 Nachhaltigkeitsansätze in Arbeitsvorbereitung und Einkauf .....	7
4.2 Nachhaltigkeitsmaßnahmen in der Mechanischen Fertigung .....	10
4.3 Nachhaltigkeitsmaßnahmen in Montage und Tryout .....	12
4.4 Übergreifende Nachhaltigkeitsmaßnahmen .....	14
<b>5 Quantitative Analyse der Werkzeugemissionen .....</b>	<b>18</b>
5.1 Ergebnisse der quantitativen Analyse der Werkzeugemissionen .....	20
5.1.1 Emissionen eines durchschnittlichen Spritzgusswerkzeugs .....	20
5.1.2 Unterschiede in der Emissionsverteilung .....	22
5.2 Fazit der Emissionsanalyse .....	22
<b>6 Systematische Steigerung der Nachhaltigkeit in der Werkzeugherstellung .....</b>	<b>23</b>
<b>Exkurs: Vergleichsdaten zu typischen Emissionsquellen .....</b>	<b>25</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>28</b>

## Impressum

Leitfaden zur nachhaltigen Werkzeugherstellung

Copyright © 2025

Autoren: Günther Schuh, Wolfgang Boos, Jonas Kenfenheuer, Leonhard Klisch, Helen Baumert

Werkzeugmaschinenlabor WZL

der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

Campus-Boulevard 30

D-52074 Aachen

[www.wzl.rwth-aachen.de](http://www.wzl.rwth-aachen.de)

## SustainTool – Werkzeugbau als Motor der Nachhaltigkeit

Der Werkzeugbau spielt eine zentrale Rolle für die industrielle Wertschöpfung und nimmt damit eine Schlüsselposition in der Transformation hin zu einer nachhaltigen Produktion ein. Produzierende kleine und mittlere Unternehmen (KMU) wie zum Beispiel Werkzeugbaubetriebe beziehen ihren Wettbewerbsvorteil typischerweise aus einem hohen Qualitätsstandard in Verbindung mit einer hohen Fertigungstiefe. Die über Jahrzehnte aufgebaute Reputation und der qualitative Vorsprung werden durch die steigende Qualität der Produkte auf dem internationalen Markt zunehmend bedroht. Der zugleich steigende regulatorische und gesellschaftliche Druck, die Nachhaltigkeit der Prozesse und Produkte zu steigern, stellt die Werkzeugbaubetriebe vor eine große Herausforderung. Der häufig als Bedrohung wahrgenommene Wandel birgt jedoch auch eine Chance: Insbesondere Kunden aus der Serienfertigung erwarten eine ganzheitliche Betrachtung von Nachhaltigkeitsaspekten und die Entwicklung nachhaltiger Produkte. Als zentrales Glied in der industriellen Wertschöpfungskette hat der Werkzeugbau die wesentliche Möglichkeit, über nachhaltige Konstruktions- und Fertigungsprinzipien direkt auf die Klimawirkung nachgelagerter Produktionsprozesse Einfluss zu nehmen. Neben den klassischen Kriterien wie Zeit, Qualität und Kosten bietet die Nachhaltigkeit somit auf dem internationalen Markt ein Differenzierungs- und Alleinstellungsmerkmal, was zur Steigerung der langfristigen Wettbewerbsfähigkeit beiträgt.

Vor diesem Hintergrund wurde das Forschungsprojekt SustainTool initiiert. Ziel des Projekts ist es, ein Vorgehen zur ganzheitlichen Abbildung der Nachhaltigkeit entlang des Lebenszyklus von Werkzeugen zu entwickeln und konkrete Lösungen für die relevanten Handlungsfelder zu erarbeiten. Die im Forschungsprojekt entwickelten Methoden sollen Unternehmen in die Lage versetzen, Prozesse und Produkte systematisch auf ihre Nachhaltigkeit zu überprüfen und gezielt zu optimieren. Dabei steht die kontinuierliche Erfassung des CO<sub>2</sub>e-Fußabdrucks sowie die Maximierung der Materialeffizienz in den Phasen Werkzeugentwicklung, -herstellung, -nutzung und -ausmusterung im Mittelpunkt. In diesem Zusammenhang soll ein Industry Carbon Footprint (ICF) erarbeitet werden, welcher als Benchmark für die Unternehmen der Branche dienen soll. Anhand von praxisnahen Beispielen sollen den Werkzeugbaubetrieben Möglichkeiten für einen effizienteren Energie- und Materialeinsatz aufgezeigt werden.



Abbildung 1: Projektstruktur SustainTool

Dieser Leitfaden präsentiert die Ergebnisse des Arbeitspakets 4 und bietet einen umfassenden Überblick über relevante Nachhaltigkeitsaspekte in der Werkzeugherstellung. Er stellt priorisierte Nachhaltigkeitsmaßnahmen entlang der Prozesskette und Best Practices vor. Zudem bietet er Hilfestellungen für eine zielgerichtete Weiterentwicklung und liefert eine quantitative Darstellung zentraler Emissionstreiber.

Projektpartner:



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 01IF00374C, Projektlaufzeit:2024-2026

# 1 Nachhaltigkeit als Erfolgsfaktor in der Werkzeugherstellung

Die Branche Werkzeugbau in Deutschland und Österreich steht seit Jahrzehnten für Präzision, Qualität und Zuverlässigkeit. Diese klassischen Stärken sichern bis heute eine führende Rolle im internationalen Wettbewerb. Angesichts steigender globaler Konkurrenz, schwankender Märkte und wachsender regulatorischer Anforderungen reicht dieser traditionelle Vorsprung jedoch nicht mehr aus. Zunehmend rücken ökologische und gesellschaftliche Erwartungen in den Fokus, sodass Nachhaltigkeit, verstanden als Zusammenspiel von Umwelt, Soziales und Ökonomie, zum entscheidenden Erfolgsfaktor der Zukunft wird.

Besonders die Themen Material- und Energieeffizienz gewinnen dabei an Bedeutung. Werkzeuge sind in ihrer Herstellung und Nutzung ressourcenintensiv. Schon kleine Verbesserungen im Materialeinsatz oder in der Energieverwendung können die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren und gleichzeitig die Werkzeug- und Stückkosten spürbar senken. Damit trägt eine nachhaltige Werkzeugherstellung nicht nur zum Klimaschutz bei, sondern stärkt unmittelbar die wirtschaftliche Stabilität der Betriebe in Hochlohnländern.

Darüber hinaus verschärfen sich die externen Rahmenbedingungen. Investoren berücksichtigen zunehmend transparente ESG-Kriterien bei ihrer Entscheidungsfindung und gesetzliche Vorgaben wie die EU Taxonomie. Das Energieeffizienzgesetz (EnEfG) oder die Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) setzen zudem neue Anforderungen an die Kunden und Werkzeugbaubetriebe. Für Werkzeugbaubetriebe wird es damit unverzichtbar, ihre Wertschöpfungsketten systematisch zu analysieren, Emissionstreiber zu identifizieren und gezielt Maßnahmen zur Nachhaltigkeitssteigerung umzusetzen. Wer heute die Potenziale von Energie- und Materialeffizienz ausschöpft, schafft die Grundlage, um wettbewerbsfähig zu bleiben und neue Marktchancen im Umfeld nachhaltiger Produkte zu nutzen.

## Was heißt nachhaltige Werkzeugherstellung?

Nachhaltige Werkzeugherstellung beschreibt die Ausrichtung der Produktionsprozesse und Unternehmensstrukturen an den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit: Umwelt, Soziales und Unternehmensführung, kurz ESG. Ganzheitliche Nachhaltigkeit bedeutet dabei, diese drei Bereiche so miteinander zu verknüpfen, dass sie in Balance mit wirtschaftlichen Anforderungen stehen. Die drei Dimensionen und ihre branchenspezifische Bedeutung für den Werkzeugbau sind in der folgenden Abbildung 2 erläutert.

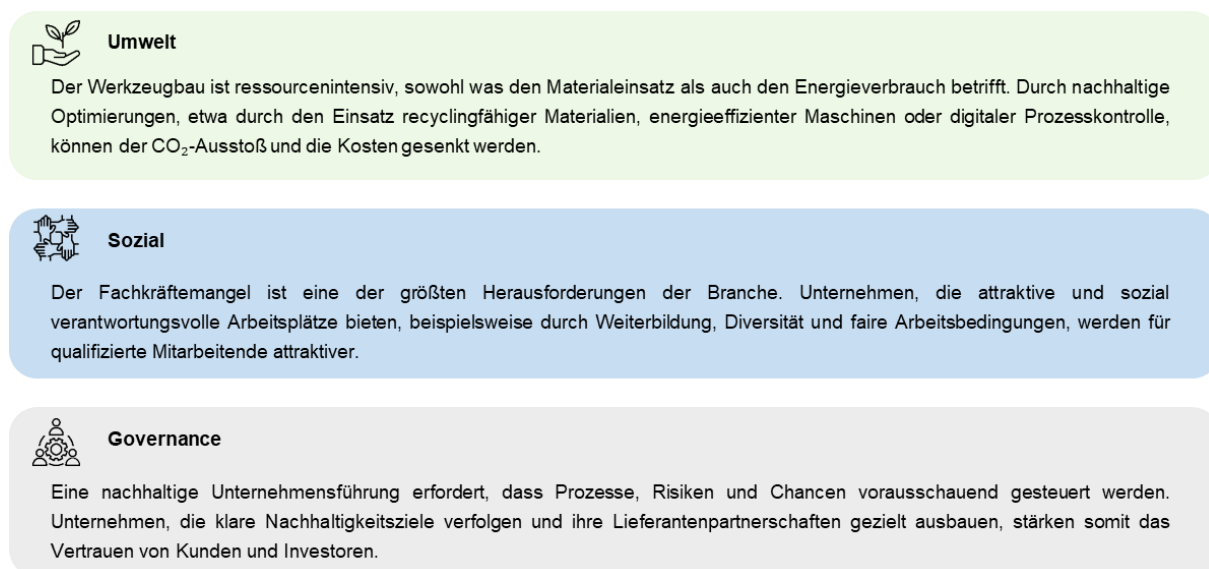


Abbildung 2: ESG-Dimensionen im Werkzeugbau

## Warum kann es sich für Werkzeugbaubetriebe lohnen, nachhaltig zu werden?

Die Branche Werkzeugbau in Deutschland und Österreich steht unter massivem Wettbewerbsdruck. Zwischen 2018 und 2024 ist die durchschnittliche Umsatzrendite deutscher Werkzeugbaubetriebe um 39 % gesunken (WZL & IPT Aachen 2024). Fast die Hälfte der Unternehmen erwirtschaftet weniger als 5 Mio. Euro Umsatz pro Jahr (Boos et al. 2022). Gleichzeitig gewinnen Nachhaltigkeitsanforderungen zunehmend an Bedeutung, regulatorisch wie marktseitig.

Vor diesem Hintergrund rückt Nachhaltigkeit immer stärker in den Fokus als wirtschaftlich relevanter Wettbewerbsfaktor. Sie ist längst kein rein ethisches Anliegen mehr, sondern entwickelt sich zu einem strategischen Vorteil, sowohl auf der Kostenseite als auch beim Umsatz. Die wirtschaftlichen und organisatorischen Chancen einer konsequent nachhaltigen Ausrichtung lassen sich in drei zentralen Handlungsfeldern zusammenfassen:

- **Effizienzsteigerung:**

In der Praxis zeigen sich Einsparpotenziale von bis zu 30 % beim Energie- und Materialverbrauch, etwa durch digitale Monitoring-Systeme, bessere Datenanalysen oder Prozessautomatisierung. Laut Studien kann bereits eine reine Transparenz der Verbräuche den Energieeinsatz um 10 % senken, ohne dass große Investitionen nötig sind (Stefan Willeke 2015; Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerke 2023).

- **Kohlenstoffkosten:**

Der erwartete CO<sub>2</sub>-Preis im EU-Emissionshandel (ETS) liegt zwischen 2026 und 2030 bei durchschnittlich 100 €/t. Unternehmen, die ihren Fußabdruck nicht aktiv senken, müssen künftig mit erheblichen Zusatzkosten rechnen (Statista 2025a, 2025b).

- **Rechtssicherheit:**

Regulatorische Vorgaben wie die EU-Taxonomie, das Lieferkettengesetz oder die CSRD schaffen ein immer komplexeres und dynamischeres Umfeld. Auch kleine und mittlere Werkzeugbaubetriebe sind davon indirekt betroffen, beispielsweise über Kundenanforderungen, Ausschreibungen oder den Zugang zu Kapital (European Commission 2022). Trotz bestehender Unsicherheiten über die konkrete Ausgestaltung wird deutlich, dass eine frühzeitige Anpassung unverzichtbar ist.

Zunehmend fordern große Abnehmer wie OEMs, insbesondere aus der Automobil- und Elektronikindustrie, belastbare Nachhaltigkeitsnachweise. Viele dieser Unternehmen haben Netto-Null-Ziele definiert, die auch ihre Lieferkette einbeziehen. Das bedeutet: Nachhaltigkeit ist längst Teil von Ausschreibungs- und Einkaufsentscheidungen. (BMW Group 2024; VW 2022)

Die Spritzgussbranche erzielte 2024 in Deutschland einen Umsatz von 1.730 Mio. € und in Österreich von 536 Mio. €. Bereits ein Plus von nur einem Prozent durch nachhaltigere Angebote würde einem zusätzlichen jährlichen Marktvolumen von rund 2,2 Mio. € entsprechen (Eurostat 2024). Kombiniert mit Effizienzgewinnen ergibt sich eine realistische Perspektive für mehr wirtschaftliche Stabilität in einem herausfordernden Umfeld.

## 2 Methodisches Vorgehen und Forschungsdesign

Das Forschungsprojekt SustainTool verfolgt einen systematischen Ansatz, um Nachhaltigkeit im Werkzeugbau messbar und praxisnah umsetzbar zu machen. Abbildung 3 zeigt die drei zentralen Bausteine des methodischen Vorgehens, die zugleich die Struktur der folgenden Kapitel bilden.

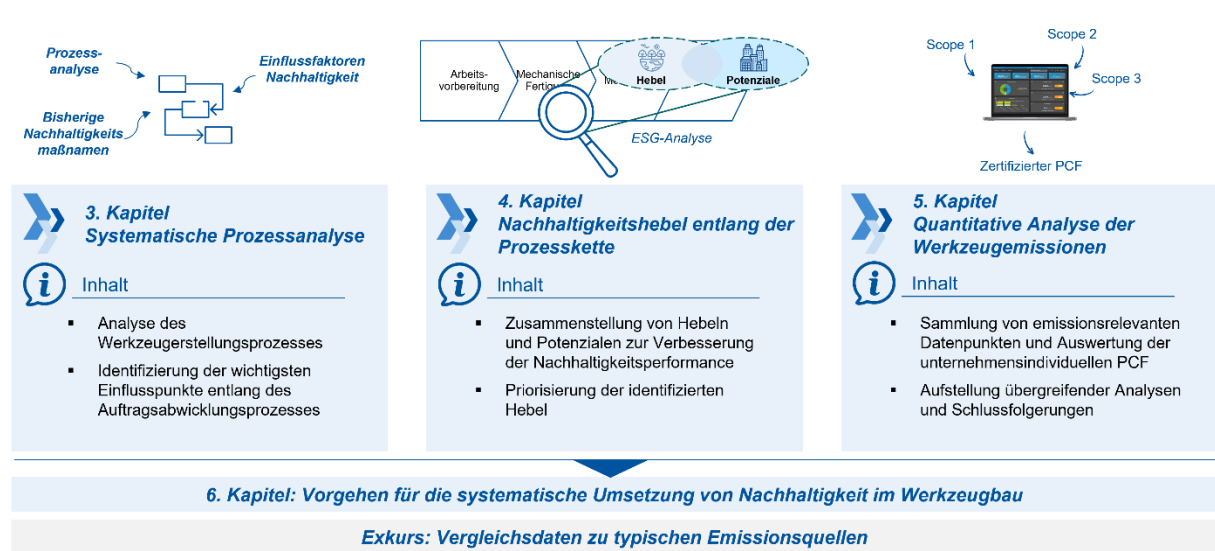


Abbildung 3: Methodisches Vorgehen

Im ersten Schritt erfolgte eine Status-quo-Analyse der teilnehmenden Unternehmen (Kapitel 3). Dabei wurden die wichtigsten Einflussfaktoren entlang der Auftragsabwicklung erfasst und bestehende Nachhaltigkeitsmaßnahmen dokumentiert. Darauf aufbauend wurden in Workshops und Interviews mehr als 300 Hebel gesammelt, strukturiert und zu einem Katalog von priorisierten Maßnahmen verdichtet (Kapitel 4). Ergänzend dazu wurde eine quantitative Analyse der Werkzeugemissionen durchgeführt (Kapitel 5). Mithilfe des zertifizierten „CO<sub>2</sub>-Werkzeugpass“ konnten fünf repräsentative Spritzgusswerkzeuge ausgewertet, die Emissionen entlang der Scopes 1, 2 und 3 transparent dargestellt und zentrale Emissionstreiber identifiziert werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird in Kapitel 6 ein Vorgehensmodell vorgestellt, das Unternehmen dabei unterstützt, die identifizierten Nachhaltigkeitspotenziale systematisch in Verbesserungsprozesse zu überführen. Das Modell zeigt Schritt für Schritt, wie Potenziale bewertet, Handlungsfelder priorisiert, Ziele konkretisiert und geeignete Maßnahmen ausgewählt und umgesetzt werden können. In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Ergebnisse im Detail dargestellt; ein ergänzender Exkurs ordnet sie anhand externer Vergleichsdaten zu typischen Emissionsquellen ein.

### 3 Systematische Prozessanalyse der Werkzeugherstellung

Die Prozessanalyse bildet die Grundlage zur systematischen Abbildung der Phase der Werkzeugherstellung. In sechs beteiligten Unternehmen wurden die spezifischen Schritte der Werkzeugherstellung detailliert erfasst. Anschließend wurden die Prozessfolgen strukturiert und konsolidiert. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen als Basis für die Identifikation und Priorisierung der Nachhaltigkeitshebel entlang der Prozesskette. Bei der Analyse der Werkzeugherstellung in den teilnehmenden Unternehmen zeigten sich teilweise deutliche Unterschiede in den einzelnen Prozessketten. So variieren etwa die Reihenfolge und die Kombination einzelner Fertigungsschritte, beispielsweise beim Einsatz und Zeitpunkt von Wärmebehandlungen, beim Umfang der Schleifoperationen oder bei der Einbindung additiver Verfahren. Auch im Bereich der Qualitätsprüfung sowie bei der Nachbearbeitung mit Beschichtungs- oder Gravurprozessen traten abweichende Vorgehensweisen auf.

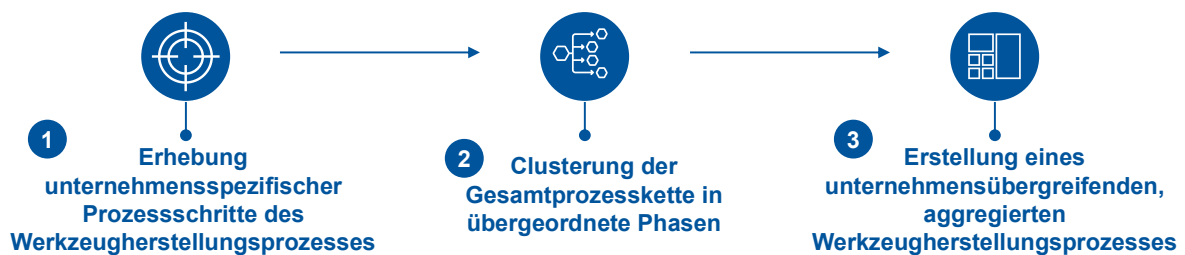


Abbildung 4: Vorgehensweise der Prozessanalyse

Aus der Zusammenführung dieser individuellen Prozessketten wurde ein unternehmensübergreifendes Gesamtmodell abgeleitet. Dieses aggregierte Prozessbild zeigt die wesentlichen Haupt- und Teilprozesse der Werkzeugherstellung von der Arbeitsvorbereitung über die mechanische Fertigung bis hin zur Montage und zum Tryout (vgl. Abbildung 5). Ergänzt wird der Ablauf durch übergreifende Unterstützungsfunktionen, die für den Betrieb zentral sind, etwa Personalmanagement, Gebäudetechnik oder betriebliche Angebote.

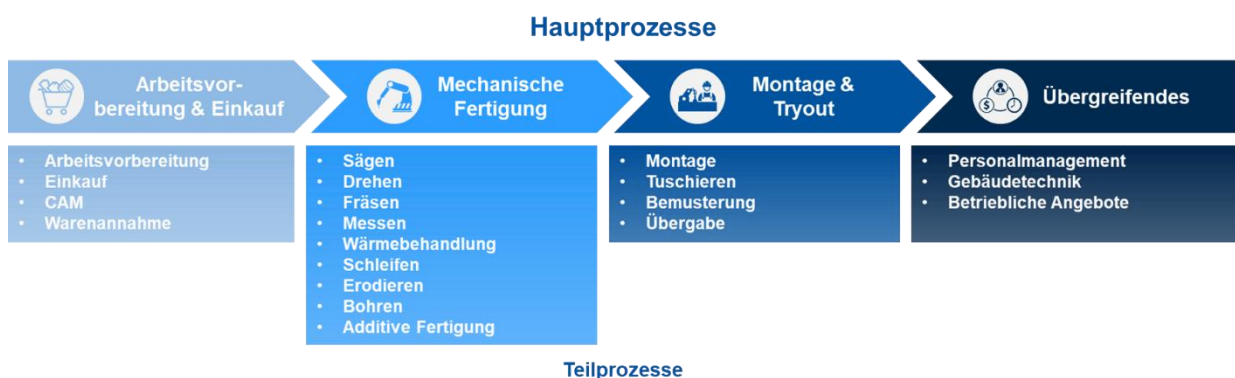


Abbildung 5: Identifizierte Nachhaltigkeitsrelevante Prozessbereiche der Werkzeugherstellung

Die übergreifende Darstellung der Haupt- und Teilprozesse dient als Ausgangspunkt für die anschließende Ableitung von Nachhaltigkeitshebeln. Auf Basis des Prozessmodells lassen sich Maßnahmen kategorisieren und systematisch den Bereichen Arbeitsvorbereitung und Einkauf, mechanische Fertigung, Montage & Tryout sowie übergreifenden Funktionen zuordnen. Damit bildet das Modell die methodische Brücke zwischen der reinen Prozessaufnahme und der in Kapitel 4 dargestellten Priorisierung konkreter Stellhebel.

## 4 Nachhaltigkeitsmaßnahmen entlang der Prozesskette

Zur Identifikation zentraler Maßnahmen für einen nachhaltigen Werkzeugherstellungsprozess wurde ein mehrstufiges, systematisches Vorgehen gewählt. Ausgangspunkt bildeten sechs praxisnahe Workshops bei Werkzeugbaubetrieben, in denen entlang des Auftragsabwicklungsprozesses bestehende sowie potenzielle Nachhaltigkeitsmaßnahmen gesammelt und diskutiert wurden. Diese Ergebnisse wurden im Anschluss durch wissenschaftliche Recherchen ergänzt, um weitere relevante Hebel mit Fokus auf Umwelt, Soziales und Governance (ESG) zu erfassen.

### VORGEHENSWEISE



Abbildung 6: Vorgehensweise zur Sammlung und Priorisierung der Nachhaltigkeitsmaßnahmen

Die gesammelten Maßnahmen wurden anschließend strukturiert, geclustert und thematisch aufbereitet. Dopplungen wurden zusammengefasst, sodass der Maßnahmenkatalog kleiner wurde, aber konkretere Maßnahmen umfasste. Dabei zeigte sich, dass der größte Teil der identifizierten Maßnahmen dem Umweltbereich zugeordnet werden konnte, gefolgt von sozialen und einzelnen Governance-bezogenen Ansätzen. Die Verteilung der Maßnahmen vor und nach der Aufbereitung ist in Abbildung 7 dargestellt.

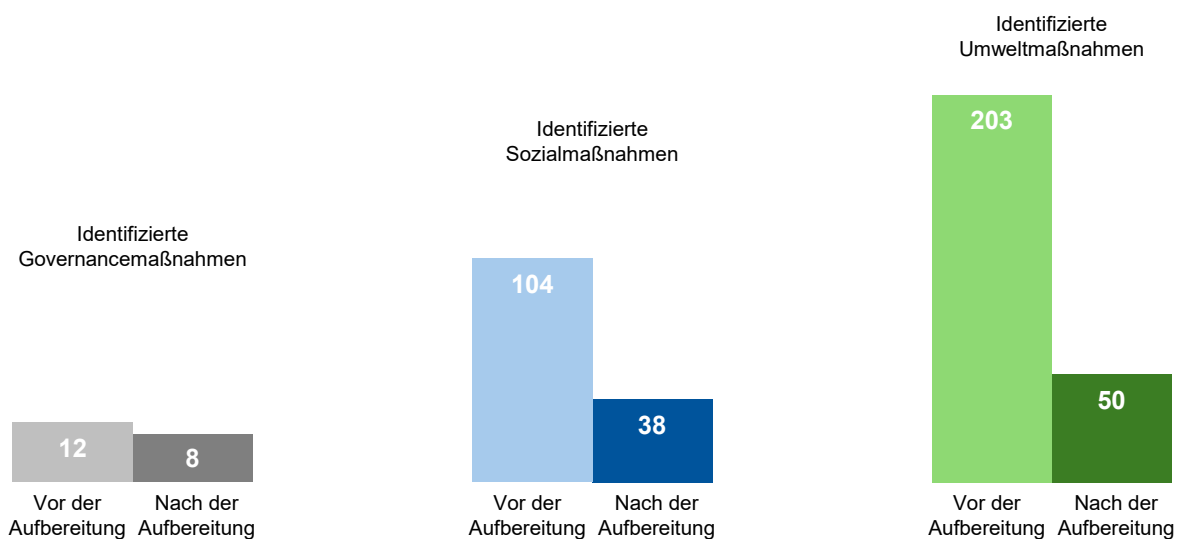


Abbildung 7: Verteilung der aufgenommenen Nachhaltigkeitsmaßnahmen

Im Anschluss wurden im Rahmen eines Fragebogens die identifizierten Maßnahmen von Fachexpert\*innen aus verschiedenen Bereichen hinsichtlich der Nachhaltigkeitswirkung und Umsetzbarkeit bewertet.

Die Beantwortung war dabei freiwillig, sodass einige Fragen, insbesondere solche außerhalb des jeweiligen Kompetenzbereichs, gezielt ausgelassen werden konnten. Abschließend erfolgte eine Priorisierung der Nachhaltigkeitsmaßnahmen auf Basis der vorliegenden Experteneinschätzungen, um besonders wirkungsvolle Ansatzpunkte für mehr Nachhaltigkeit im Werkzeugbau zu identifizieren. Diese Priorisierung anhand der Nachhaltigkeitswirkung auf der y-Achse und Umsetzbarkeit der Maßnahmen auf der x-Achse ist in der Abbildung 8 dargestellt. Die Maßnahmen sind in die Quadranten „Sofort umsetzen“, „Langfristig planen“, „Optional umsetzen“, sowie „Depriorisieren“ eingeteilt. Ein Großteil der Maßnahmen wurde als Soforthilfe für die Werkzeugbaubetriebe angesehen, wobei einige, aufgrund der komplexeren Umsetzbarkeit, als langfristige Opportunitäten klassifiziert wurden.

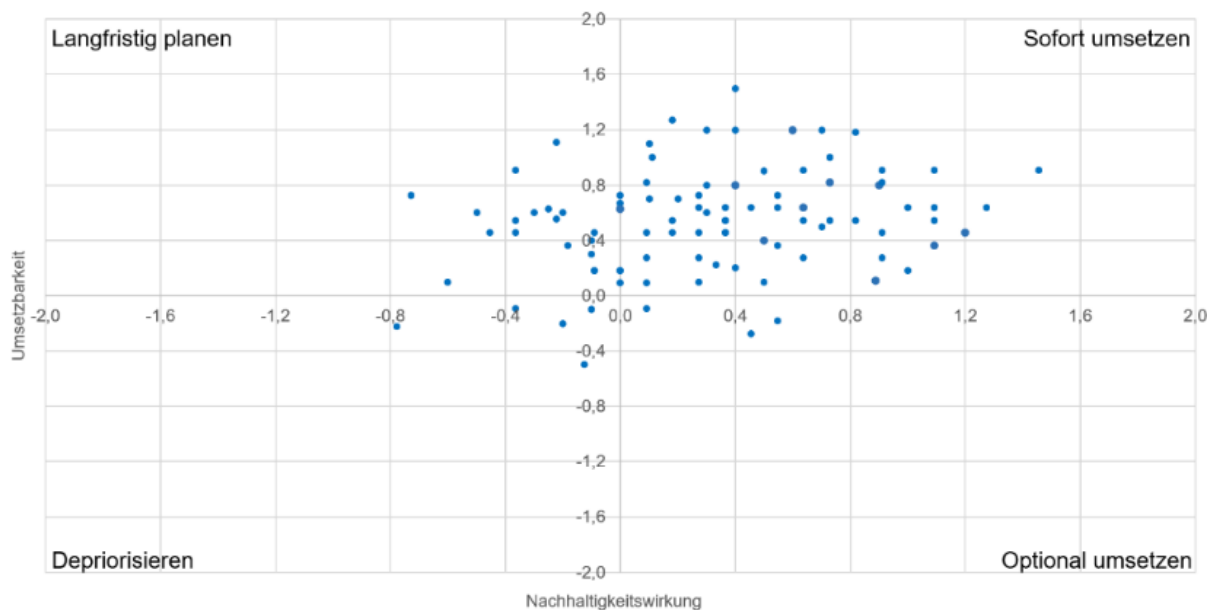


Abbildung 8: Überblick über die Bewertung der Nachhaltigkeitsmaßnahmen

## 4.1 Nachhaltigkeitsansätze in Arbeitsvorbereitung und Einkauf

Der Werkzeugherstellungsprozess beginnt mit der Arbeitsvorbereitung und dem Einkauf. In dieser Phase werden Fertigungsabläufe geplant, Arbeitspläne erstellt und Materialien sowie Normteile beschafft. Auch die Erstellung von CAM-Programmen und die Organisation der Warenannahme zählen zu den zentralen Aufgaben.

In den Prozessschritten „Arbeitsvorbereitung & Einkauf“ wurden insgesamt siebzehn Nachhaltigkeitsmaßnahmen für die Priorisierung in den Expertenworkshops identifiziert. Der Großteil dieser Maßnahmen zählt zu den Umweltmaßnahmen, von denen die meisten als „sofort umsetzen“ bewertet wurden. Auch bei den sozialen Nachhaltigkeitsmaßnahmen wurden drei von vier im oberen rechten Quadranten zugeordnet. Im Governance-Bereich wurden wiederum zwei Maßnahmen identifiziert, von denen einer sowohl eine hohe Nachhaltigkeitswirkung als auch eine hohe Umsetzbarkeit aufweist.

	Umweltmaßnahmen	Auswertung
1	Abgestimmte Terminplanung zur gemeinsamen Fertigung von ähnlichen Bauteilen	Depriorisieren
2	Verwendung von Formaufbauten und Normteilen aus Altwerkzeuge	Langfristig planen
3	Optimierung der Materialplanung durch Simulationstechnologien, um Überproduktion und Ausschuss zu reduzieren (Bsp. Bedarfsgerechte Herstellung von Elektroden)	Sofort umsetzen
4	Abfrage von Mindeststandards und Nachhaltigkeitskriterien in der Lieferantenauswahl (Code of conduct)	Optional umsetzen
5	Langfristige Verwendung von Standards für Normalien und internen Normteilen	Sofort umsetzen
6	Reduktion von Ausschuss durch Einkauf optimaler Rohlinge	Sofort umsetzen
7	Weiterverwendungen von Verpackungen	Sofort umsetzen
8	Einkauf von qualitativ hochwertigen Werkzeugen und Betriebsmitteln	Sofort umsetzen
9	Einkauf von emissionsarmen Rohmaterialien (bspw. Green Steel, Recycling)	Langfristig planen
10	Europäisches Sourcing von möglichst allen Zukaufteilen	Sofort umsetzen
11	Abfrage der CO2-Emissionen für zugekaufte Teile und Materialien	Sofort umsetzen

Tabelle 1: Einordnung der Umweltmaßnahmen im Bereich „Arbeitsvorbereitung &amp; Einkauf“

	Sozialmaßnahmen	Auswertung
1	Reduktion der Laustärke durch Lärmwürfel an der Decke	Optional umsetzen
2	Bereitstellung von ergonomischen, höhenverstellbaren, fertigungsnahen Arbeitsplätzen für die Arbeitsvorbereitung	Sofort umsetzen
3	Entlastung durch gezielte IT-Unterstützung in der Planung	Sofort umsetzen
4	Flexible und resiliente Planung mit Puffern, um Stress zu reduzieren und kurzfristige Änderungen zu bewältigen	Sofort umsetzen

Tabelle 2: Einordnung der Sozialmaßnahmen im Bereich „Arbeitsvorbereitung &amp; Einkauf“

	Governancemaßnahmen	Auswertung
1	Risikoanalyse der Lieferanten, insbesondere der Hauptlieferanten (gegenseitige Abhängigkeit, Nachhaltigkeitsrisiken, langfristige Zusammenarbeit usw.)	Langfristig planen
2	Einführung eines automatisierten, E-Mail-basierten Zahlungs- und Abrechnungsprozesses	Sofort umsetzen

Tabelle 3: Einordnung der Governancemaßnahmen im Bereich „Arbeitsvorbereitung &amp; Einkauf“

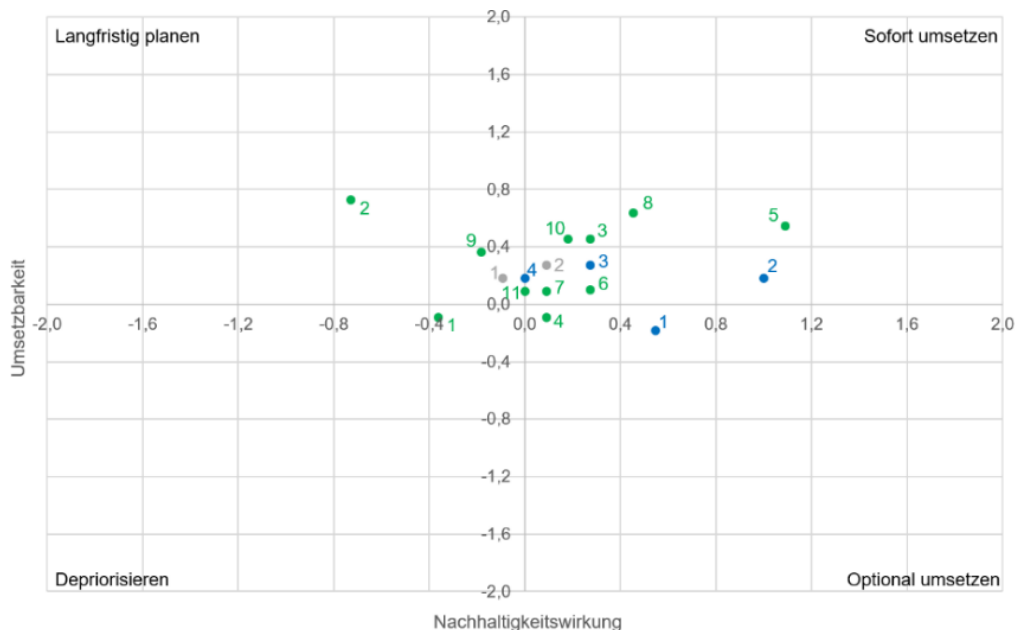


Abbildung 4: Bewertung der Nachhaltigkeitsmaßnahmen in den Bereichen AV &amp; Einkauf

Die Verteilung der Maßnahmen zeigt eine klare Tendenz zu einer mittleren bis leicht positiven Nachhaltigkeitswirkung und Umsetzbarkeit. Insbesondere die Umweltmaßnahmen konzentrieren sich nahe dem Ursprung, wobei ein leichter Schwerpunkt im Quadranten „Sofort umsetzen“ erkennbar ist. Dies deutet darauf hin, dass viele der identifizierten Maßnahmen sowohl praktikabel als auch nachhaltig sinnvoll sind. Während einige Maßnahmen langfristig geplant oder optional umgesetzt werden sollten, erscheinen viele bereits kurzfristig realisierbar und sollten daher priorisiert werden.

Es konnten insbesondere drei Maßnahmen als besonders wirkungsvoll identifiziert werden. Die höchste Umsetzbarkeit bei gleichzeitig signifikanter Nachhaltigkeitswirkung weist die Umweltmaßnahme „Langfristige Verwendung von Standards für Normalien und internen Normteilen“ auf. Diese Maßnahme zielt auf die Standardisierung und Wiederverwendung technischer Komponenten ab und trägt somit zur Ressourcenschonung und Effizienzsteigerung im Produktionsprozess bei. Ebenfalls unter den Top-Maßnahmen befindet sich der „Einkauf von qualitativ hochwertigen Werkzeugen und Betriebsmitteln“. Durch die Investition in langlebige und leistungsfähige Betriebsmittel wird nicht nur der Materialverbrauch reduziert, sondern auch die Betriebssicherheit und Produktqualität erhöht. Neben den ökologischen Maßnahmen wurde auch eine Sozialmaßnahme als besonders positiv bewertet: Die „Bereitstellung von ergonomischen, höhenverstellbaren, fertigungsnahen Arbeitsplätzen für die Arbeitsvorbereitung“. Diese Maßnahme fördert die Gesundheit der Mitarbeitenden und verbessert langfristig die Arbeitsbedingungen, was sich positiv auf die Zufriedenheit und Produktivität auswirken kann. Trotz einer geringer bewerteten Nachhaltigkeitswirkung im Vergleich zu den zuvor genannten Umweltmaßnahmen zeichnet sie sich durch eine sehr hohe Umsetzbarkeit aus und adressiert wichtige soziale Nachhaltigkeitsaspekte.

Demgegenüber stehen zwei Maßnahmen mit vergleichsweise niedriger Bewertung. Die Maßnahme „Verwendung von Formaufbauten und Normteilen aus Altwerkzeugen“ weist zwar eine hohe ökologische Wirkung auf, ist jedoch in der Praxis mit einigen Herausforderungen verbunden. Daher sollte diese Maßnahme entsprechend der Einordnung langfristig geplant werden. Die Maßnahme „Abgestimmte Terminplanung zur gemeinsamen Fertigung von ähnlichen Bauteilen“ wird dem Bereich „Depriorisieren“ zugeordnet. Sowohl die Wirkung als auch die praktische Umsetzbarkeit werden als begrenzt eingeschätzt. Möglicherweise führt die angestrebte Bündelung von Fertigungsvorgängen zu organisatorischen Komplikationen oder reduziert die Flexibilität in der Produktion.



Die systematische Produktstandardisierung ermöglicht es Unternehmen, ihre Prozesse zu vereinfachen und die Herstellungskosten deutlich zu reduzieren – gleichzeitig erleichtert ein hoher Standardisierungsgrad den Übergang in eine zirkuläre Wertschöpfung.



In Unternehmen, die einen umfassenden Ergonomie-Fokus bei der Arbeitsplatzgestaltung verfolgen, weisen die Mitarbeitenden deutlich weniger Berufserkrankungen durch repetitive Belastungen auf – gleichzeitig wird die Prozessdurchführung effizienter.

## 4.2 Nachhaltigkeitsmaßnahmen in der Mechanischen Fertigung

Zur mechanischen Fertigung gehört die eigentliche Bearbeitung der Bauteile. Typischerweise beginnt dieser Prozess mit dem Arbeitsschritt „Fräsen“, gefolgt von weiteren Fertigungsverfahren. Die Reihenfolge ist dabei sehr unternehmensspezifisch. Häufig schließen sich nach der Wärmebehandlung Schritte wie Schleifen, Erodieren, Bohren oder auch additive Fertigungsverfahren an. So werden die Bauteile auf die geforderten Maß- und Formtoleranzen gebracht.

In der mechanischen Fertigung wurden achtzehn Umwelt- und sieben Sozialmaßnahmen für die Priorisierung in den Expertenworkshops identifiziert. Somit stellt die mechanische Fertigung den Bereich mit den meisten identifizierten Umweltmaßnahmen dar. Dies hängt damit zusammen, dass in diesem Bereich die größten Energie- und Ressourcenverbräuche auftreten sowie Abfälle entstehen.

	Umweltmaßnahmen	Auswertung
1	Einsatz von IIoT zur Überwachung des Energieverbrauchs zur Identifizierung von Einsparpotenzialen	Langfristig planen
2	Optimierung der Frässtrategien, z. B. durch Anwendung der „Roll-in-Entry“-Strategie, um den Energie- und Materialverbrauch zu reduzieren	Depriorisieren
3	Einführung von nachhaltigen Kühltechniken wie Minimalmengenschmierung (MMS), Trockenbearbeitung oder kryogene Kühlung, die den Einsatz von Kühlmitteln minimieren	Sofort umsetzen
4	Verwendung von Fräsern aus recyceltem Hartmetall (z.B. bis zu 99 % Sekundärrohstoffe)	Depriorisieren
5	Realisierung einer sortenreinen Trennung der Späne	Sofort umsetzen
6	Beschaffung von neuen & energieeffizienten Maschinen (Höchster Energieverbrauch der mechanischen Fertigung im Bereich Fräsen)	Sofort umsetzen
7	Auswahl eines langlebigen KSS mit/durch Mitarbeitende, um Verbrauch und die Wechselhäufigkeit zu reduzieren	Sofort umsetzen
8	Vorrausschauender Spindelwechsel nach bestimmten Maschinenlaufzeiten zur Vermeidung von Folgeschäden	Depriorisieren
9	Nachschleifung von Fräs- und Bohrwerkzeugen und zielgerichtete Weiterverwendung (z.B. Schlichten > Schruppen > Lehrwerkstatt)	Optional umsetzen
10	Vollständige Ausnutzung und Wiederverwendung von Elektroden	Sofort umsetzen
11	Errichtung eines Katalogs oder Standardgrößen für gebrauchte Elektroden	Depriorisieren
12	Verwendung von biologisch abbaubaren Dielektrikum im Senken (z.B. deionisiertes Wasser, synthetische und biologisch abbaubare Dielektrika anstatt mineralölbasiert)	Langfristig planen
13	Sammlung nicht wiederverwendbarer Graphitelektroden (z.B. durch den Hersteller) und zentrale Aufarbeitung (um Sondermüll zu vermeiden)	Sofort umsetzen
14	Bedarfsgerechte Auslegung der Antriebe, Größe und Software der Bearbeitungsmaschinen zur Senkung des Energieverbrauchs	Langfristig planen
15	Einbau einer leistungsfähigen und umfassenden Filteranlage bei der Wärmebehandlung	Sofort umsetzen
16	Anforderungsgerechte Auslegung des Werkzeugs und Reduktion von Bedarfen für die Wärmebehandlung	Sofort umsetzen
17	Optimierung der Ofennutzung bei der Wärmebehandlung (Sammlung genügend Teile)	Sofort umsetzen
18	Implementierung einer zentralen KSS-Versorgung und -Überwachung zur Reduzierung des Ressourcen- und Energieverbrauchs	Langfristig planen

Tabelle 4: Einordnung der Umweltmaßnahmen im Bereich „Mechanische Fertigung“

	Sozialmaßnahmen	Auswertung
1	Bereitstellung eines wöchentlichen Arbeitsvorrats für die Eigenständigkeit der Bediener	Sofort umsetzen
2	Digitale Ausstattung jedes Arbeitsplatzes zur Gewährleistung einer selbstständigen Koordination und Datenverfügbarkeit	Sofort umsetzen
3	Unterstützung bei der Maschinenbestückung durch Hubvorrichtung	Sofort umsetzen
4	Vollständige Einhausung aller Maschinen zur Reduktion von Lärm- und dermatologischen Belastungen	Langfristig planen
5	Schaffung eines zentralen Rüstplatzes als Unterstützung für die internen Fertigungsmitarbeitenden	Sofort umsetzen
6	Reduktion der Poliertätigkeiten durch Hochpräzisionsfräsen	Langfristig planen
7	Verwendung eines gesundheitlich unbedenklichen Kühlschmierstoffes (z.B. bakterizidfrei, amin- und borsäurefrei, formaldehydfrei)	Sofort umsetzen

Tabelle 5: Einordnung der Sozialmaßnahmen im Bereich „Mechanische Fertigung“

Das folgende Diagramm zeigt die Nachhaltigkeitsmaßnahmen, die sich auf alle vier Quadranten verteilen. Viele dieser Maßnahmen wurden von den Experten als nachhaltig wirksam bewertet. Einzelne

Maßnahmen erreichen zudem hohe Werte auf der Umsetzbarkeitsachse, was auf eine gute Realisierbarkeit schließen lässt. Nur wenige Maßnahmen weisen eine negative Umsetzbarkeit oder Nachhaltigkeitswirkung auf, was insgesamt auf ein ausgewogenes Maßnahmenspektrum hinweist. Für die Sozialmaßnahmen ist zudem eine Tendenz erkennbar: Alle Maßnahmen befinden sich im Bereich positiver Nachhaltigkeitswirkung. Auch die Umsetzbarkeit wurde überwiegend als gut, teilweise sogar als sehr gut bewertet. Im Quadranten „Sofort umsetzen“ sind somit viele Sozialmaßnahmen vertreten.

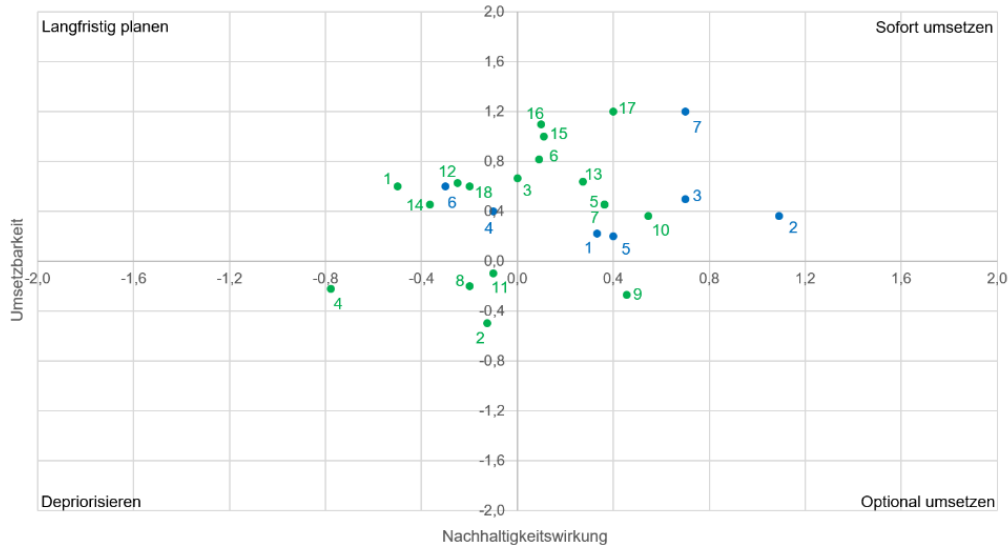


Abbildung 9: Bewertung der Nachhaltigkeitsmaßnahmen in der mechanischen Fertigung

Eine hinsichtlich der Nachhaltigkeitswirkung hoch bewerteten Umweltmaßnahmen stellt die „Optimierung der Ofennutzung bei der Wärmebehandlung durch das Sammeln einer ausreichenden Anzahl an Bauteilen“ dar. Durch die verbesserte Auslastung energieintensiver Wärmebehandlungsprozesse können signifikante Energieeinsparungen erzielt und unnötige Emissionen vermieden werden. Ergänzend dazu bietet die Maßnahme der „anforderungsgerechten Auslegung von Werkzeugen mit gleichzeitiger Reduktion der Bedarfe für Wärmebehandlung“ eine konstruktionsseitige Möglichkeit zur Vermeidung energieintensiver Prozessschritte. Trotz der geringen Umsetzbarkeit, die vermutlich auf komplexe Abstimmungsprozesse in der Konstruktion zurückzuführen ist, wurde der Beitrag zur Ressourcenschonung und Energieeinsparung hoch bewertet.

Im Bereich der Sozialmaßnahmen ist die „Verwendung eines gesundheitlich unbedenklichen Kühlschmierstoffs“ besonders hervorzuheben. Der Einsatz bakterizidfreier, amin- und borsäurefreier sowie formaldehydfreier Produkte verbessert nicht nur die Umweltverträglichkeit, sondern wirkt sich auch positiv auf die Arbeitsbedingungen und die Gesundheit der Beschäftigten aus. Abschließend ist die Maßnahme zur „digitalen Ausstattung jedes Arbeitsplatzes zur Sicherstellung selbstständiger Koordination und Datenverfügbarkeit“ hervorzuheben. Sie weist die höchste Umsetzbarkeit aller betrachteten Maßnahmen auf und ermöglicht eine effizientere Produktionssteuerung sowie eine verbesserte Informationsverfügbarkeit. Somit kann sichergestellt werden, dass alle Mitarbeitende Zugang zu den zentralen Unternehmenssystemen und zur IT-Umgebung haben und relevante Informationen in digitaler Form abrufen können.

Eine Maßnahme mit vergleichsweise geringer Bewertung ist die „Verwendung von Fräswerkzeugen aus recyceltem Hartmetall“. Es handelt sich um eine Umweltmaßnahme, deren Umsetzbarkeit jedoch nur eingeschränkt in der Hand von Werkzeugbaubetrieben liegt. Zwar sammeln bereits einige Werkzeugbaubetriebe gebrauchte Fräswerkzeuge und geben diese an die Hersteller zurück, ein gezielter Einsatz von recycelten Fräswerkzeugen findet jedoch nur selten statt.



Die Herstellung neuer Hartmetallwerkzeuge aus recyceltem Material verbraucht deutlich weniger Energie und reduziert den CO<sub>2</sub>-Ausstoß signifikant – gleichwohl ist der Anteil recycelter Hartmetallwerkzeuge noch ausbaufähig.



Der Einsatz von Hubvorrichtungen in der mechanischen Fertigung bieten das Potenzial, die Anzahl an Überlastungs- und Rückenverletzungen zu reduzieren sowie die Mitarbeitendenzufriedenheit zu steigern.

### 4.3 Nachhaltigkeitsmaßnahmen in Montage und Tryout

Im Bereich Montage werden die einzelnen Werkzeugkomponenten präzise zusammengebaut und durch Tuschieren feinjustiert. Im anschließenden Try-out wird das Werkzeug unter realen Produktionsbedingungen erprobt. Dabei werden die Funktion, Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität überprüft. In dieser Phase werden Nacharbeiten, Optimierungen und Wartungsmaßnahmen durchgeführt, bevor das vollständig abgestimmte Werkzeug an die Produktion oder den Kunden übergeben wird.

In den Prozessschritten „Montage & Tryout“ wurden insgesamt sechzehn Nachhaltigkeitsmaßnahmen identifiziert, die in den Expertenworkshops priorisiert wurden. Davon entfallen zehn auf die soziale Dimension – so viele wie in keinem anderen Prozessschritt. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass die Ergonomie in der Montage und im Try-out einen sehr wichtigen Faktor darstellt. Darüber hinaus muss in diesen Schritten häufig verlorene Zeit aufgeholt werden, um den geplanten Fertigstellungstermin einzuhalten. Das führt zu einer erhöhten mentalen Belastung der Mitarbeitenden.

	Umweltmaßnahmen	Auswertung
1	Festlegung einheitlicher Zuständigkeiten und klarer Übergaben zur Minimierung von Wiederholungen und Schleifen	Sofort umsetzen
2	Verwendung von umweltschonenden Reinigungsalternativen ( wie Lösungsmittelfreie Reiniger, Laserreinigung oder Ultraschallreinigung), um ohne Lösungsmittel umweltschonend zu reinigen	Sofort umsetzen
3	Sparsame, fachgerechte Verwendung von Trockeneis zur Reinigung bei Wartung und Oberflächenbearbeitung	Langfristige Planung
4	Zentrale Druckluftreduzierung (z.B. auf 2 bar zur Lärm-, Energie- und Verbrauchsreduzierung)	Langfristige Planung
5	Kurze Transportwege zwischen Try-out und Nachbearbeitung (z.B. durch eigene Tuschierpresse)	Sofort umsetzen
6	Verkürzung der Try-out Phase (First-Time-Right) durch vorgelagerte Simulation und Optimierungen	Sofort umsetzen

Tabelle 6: Einordnung der Umweltmaßnahmen im Bereich „Montage & Tryout“

	Sozialmaßnahmen	Auswertung
1	Strukturiertes Fehler- und Qualitätsmanagement für den Wissensaustausch in der Try-Out-Phase	Sofort umsetzen
2	Ergonomische Anordnung von Werkzeugen und Materialien	Sofort umsetzen
3	Trennung von Montage und der mechanischen Fertigung zur Lärmreduktion (z.B. Lärmwände)	Sofort umsetzen
4	Regelmäßige Schulungen zur korrekten Körperhaltung und Handhabung von Werkzeugen	Sofort umsetzen
5	Bereitstellung von qualitativem, bedarfsgerechtem Equipment für benötigte Schritte (Bspw. Kugelgelenk, Lupe)	Sofort umsetzen
6	Einführung ergonomischer Montagetische (z. B. höhenverstellbarer Lufttische) zur Optimierung des Montageprozesses	Sofort umsetzen
7	Nutzung einer Tisch-Drehmaschine zum Polieren von runden Stiften	Sofort umsetzen
8	Einsatz digitaler Assistenzsysteme zur Unterstützung der Mitarbeitenden im Try-out-Prozess	Sofort umsetzen
9	Bereitstellung eines umfassenden Angebots bei der Inbetriebnahme (z.B. Kundens Schulungen) zur Steigerung der Nutzerkompetenz	Sofort umsetzen
10	Einführung von Hitzeschutzhandschuhen im Try-out Prozess	Sofort umsetzen

Tabelle 7: Einordnung der Sozialmaßnahmen im Bereich „Montage &amp; Tryout“

Die Experten bewerteten die Nachhaltigkeitswirkung der Umweltmaßnahmen durchweg als hoch. Die Umsetzbarkeit dieser Maßnahmen zeigt hingegen ein differenzierteres Bild: Die Werte schwanken um den Nullpunkt, sodass einige Maßnahmen kurzfristig realisierbar erscheinen, während andere einen höheren organisatorischen oder technischen Aufwand erfordern. Demgegenüber präsentieren sich die Sozialmaßnahmen deutlich homogener. Alle dargestellten Maßnahmen befinden sich im Quadranten „Sofort umsetzen“, was sowohl eine hohe Umsetzbarkeit als auch eine hohe Nachhaltigkeitswirkung belegt. Diese Verteilung unterstreicht die Bedeutung sozialer Faktoren in den Bereichen Montage und Try-out.

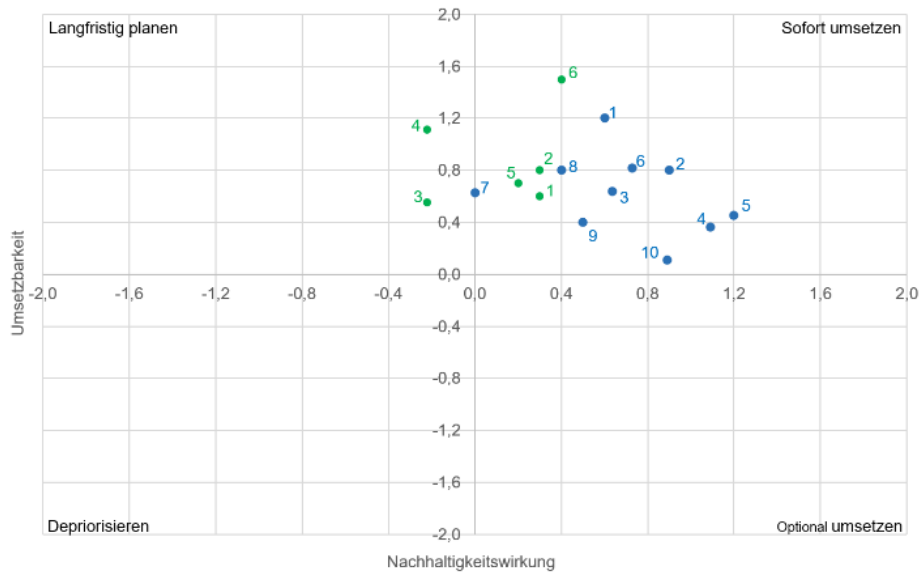


Abbildung 10: Bewertung der Nachhaltigkeitsmaßnahmen in der Montage und im Tryout

Die Umweltmaßnahme „Verkürzung der Try-Out-Phase durch vorgelagerte Simulation und Optimierungen“ wurde als besonders wirksam bewertet. Mit einer Nachhaltigkeitswirkung von 1,5 leistet sie den höchsten Beitrag zur Ressourcenschonung unter den betrachteten Maßnahmen. Durch den Ansatz „First Time Right“ kann der Material- und Energieverbrauch in der Erprobungsphase deutlich reduziert werden. Die Umsetzbarkeit liegt mit 0,4 im mittleren Bereich, was auf einen nicht zu unterschätzenden Investitions- und Qualifizierungsbedarf für Simulationsprozesse hinweist.

Im Bereich der sozialen Nachhaltigkeit zeigen sich drei Maßnahmen mit besonders positiver Wirkung. Das „strukturierte Fehler- und Qualitätsmanagement in der Try-out-Phase“ unterstützt den systematischen Wissensaustausch und die kontinuierliche Verbesserung. Die „ergonomische Anordnung von

Werkzeugen und Materialien“ fördert mit einer hohen Umsetzbarkeit und einer Wirkung von 0,8 die physische Entlastung der Mitarbeitenden und trägt zur Arbeitsplatzsicherheit bei. Die „Bereitstellung von qualitativ hochwertigem, bedarfsgerechtem Equipment“ weist die höchste Umsetzbarkeit aller betrachteten Maßnahmen in diesem Segment auf, wenngleich die Nachhaltigkeitswirkung etwas geringer bewertet wurde. Demgegenüber steht die Maßnahme „Nutzung einer Tisch-Drehmaschine zum Polieren von runden Stiften“, deren Umsetzbarkeit von den Experten als begrenzt bewertet wurde.



Durch vorgelagerte Simulationen wird die Anzahl der physischen Iterationsschleifen reduziert, wodurch sich die Try-Out-Phase deutlich verkürzt.



Ergonomisch gestaltete Arbeitsplätze reduzieren Greif-, Such- und Bewegungszeiten und senken Überlastungsbeschwerden. Gleichzeitig wirkt sich dies positiv auf die Zufriedenheit und die Fehlerreduktion aus.

## 4.4 Übergreifende Nachhaltigkeitsmaßnahmen

Über alle Phasen hinweg begleiten übergreifende Tätigkeitenqualifizierter den Prozess. Dazu gehören beispielsweise das Personalmanagement zur Sicherstellung Mitarbeitender, die Gebäudetechnik zur Aufrechterhaltung der Infrastruktur sowie betriebliche Angebote, die das Arbeitsumfeld unterstützen.

Bei der Identifizierung von Maßnahmen in Unternehmen hat sich gezeigt, dass viele Maßnahmen nicht nur einem Prozessschritt zuzuordnen sind, sondern mehrere Prozessschritte beeinflussen. Dies trifft insbesondere auf die Governancemaßnahmen zu, von denen ein hoher Anteil zu den übergreifenden Nachhaltigkeitsmaßnahmen zugeordnet wurde.

	<b>Umweltmaßnahmen</b>	<b>Auswertung</b>
1	Reduzierung und Optimierung des Druckluftverbrauchs (und Leckagenprüfung)	Sofort umsetzen
2	Einführung eines standardisierten CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks für Werkzeuge über den gesamten Lebenszyklus	Langfristig planen
3	Nutzung der Abwärme z.B. der Druckluftkompressoren oder der Try-out-Maschine	Sofort umsetzen
4	Nutzung von Biomasseheizungen (Holzpellets/Biogas), Erd- oder Fernwärme	Sofort umsetzen
5	Verbesserung der gebäudetechnischen Energieeffizienz z.B. durch Isolierung der Fenster	Sofort umsetzen
6	Installation effizienter Filtersysteme zur Verbesserung der Luftqualität	Sofort umsetzen
7	Verwendung von bedarfsgerechten, wiederverwendbaren Verpackungsmaterialien	Sofort umsetzen
8	Reduktion der Sondertransporte und Transportemissionen durch gebündelte Transporte	Langfristig planen
9	Bezug von Ökostrom	Sofort umsetzen
10	Reduktion von Fahrtwegen und Pendlerverkehr durch Homeofficeangebote	Sofort umsetzen
11	Gezielter Einsatz von Additive Fertigung, um Rohmaterial zu reduzieren	Langfristig planen
12	Elektrifizierung des Fuhrparks	Sofort umsetzen
13	Reduktion von Ausschuss durch Fehlerreduktion, -management und Verschrottungsprävention	Sofort umsetzen
14	Identifizierung und Tracking zielgerichteter Nachhaltigkeitskennzahlen	Langfristig planen
15	Aufbau einer PV-Anlage	Sofort umsetzen

Tabelle 8: Einordnung der übergreifenden Umweltmaßnahmen

	<b>Sozialmaßnahmen</b>	<b>Auswertung</b>
1	Nutzung von ergonomischen Bodenunterlagen	Sofort umsetzen
2	Förderung von Ausgleichübungen und Mikropausen während der Arbeitszeit	Sofort umsetzen
3	Angebot von Gesundheitsprogrammen und Physiotherapie für Mitarbeitende	Sofort umsetzen
4	Etablierung einer Kultur hoher Eigenverantwortung	Sofort umsetzen
5	Evaluierung der psychischen Belastungen am Arbeitsplatz (z.B. in der AV)	Sofort umsetzen
6	Direkte Einbindung der Lehrwerkstatt in die Wertschöpfung	Sofort umsetzen
7	Einbindung der Mitarbeitenden in die Strategieentwicklung und Unternehmenspositionierung	Sofort umsetzen
8	Gezielte Weiterbildung der Mitarbeitenden im Nachhaltigkeitsbereich	Sofort umsetzen
9	Vielfältige Angebote der gemeinsamen Unternehmensausflüge und Events	Sofort umsetzen
10	Mitarbeiterorientierte Arbeitszeitmodelle (z.B. Homeoffice, Gleitzeit und wenige Nachtschichten)	Sofort umsetzen
11	Einsatz höhenverstellbarer Schreibtische und gezielte Beleuchtung	Sofort umsetzen
12	Etablierung von regelmäßigen Mitarbeitendengesprächen	Sofort umsetzen
13	Schaffung eines vielfältigen und abwechslungsreichen Aufgabenbereichs (z.B. Job Rotation)	Langfristig planen
14	Regelmäßige, monatliche Überprüfung und Sammlung von Verbesserungsideen aller Arbeitsplätze hinsichtlich Arbeitssicherheit und ergonomischer Standards	Sofort umsetzen
15	Bereitstellung von persönlicher Schutzausrüstung (PSA) und klaren Sicherheitshinweisen sowie der Einsatz eines internen Sicherheitsbeauftragten	Sofort umsetzen
16	Verbau bodentiefer und großer Fensterflächen, um natürliches Licht und angenehme Arbeitsatmosphäre zu ermöglichen	Langfristig planen
17	Strukturiertes Ideenmanagement und systematisches Vorschlagswesen mit attraktivem Anreizsystem	Sofort umsetzen

Tabelle 9: Einordnung der übergreifenden Sozialmaßnahmen

	<b>Governancemaßnahmen</b>	<b>Auswertung</b>
1	Regelmäßige Informationsveranstaltungen für Mitarbeitende zu Zielen & Strategien	Sofort umsetzen
2	Etablierung eines kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP) zur Förderung einer nachhaltigen Verbesserungskultur	Sofort umsetzen
3	Klare und kommunizierte Nachhaltigkeitstrategie	Sofort umsetzen
4	Digitaler Kooperationsraum und Austauschformate für den Austausch zwischen Unternehmen	Langfristig planen
5	Gestaltung von schlanken Prozessen durch kleine, räumlichnahe und effiziente Strukturen	Sofort umsetzen
6	Etablierung einer offenen Fehlerkultur und Diskussion von Fehlern (z.B. durch regelmäßiger Feedbacks und Projekt lessons learned)	Sofort umsetzen

Tabelle 10: Einordnung der übergreifenden Governancemaßnahmen

Wie in den nachfolgenden Abbildungen ersichtlich, wurden alle Umwelt-, Sozial- und Governancemaßnahmen mit einer hohen Nachhaltigkeitswirkung bewertet. Die Umsetzbarkeit dieser Maßnahmen

differiert jedoch: Während einige Maßnahmen eine unmittelbare Realisierung nahelegen, bedürfen andere einer sorgfältigeren Vorbereitung und Ressourcenplanung.

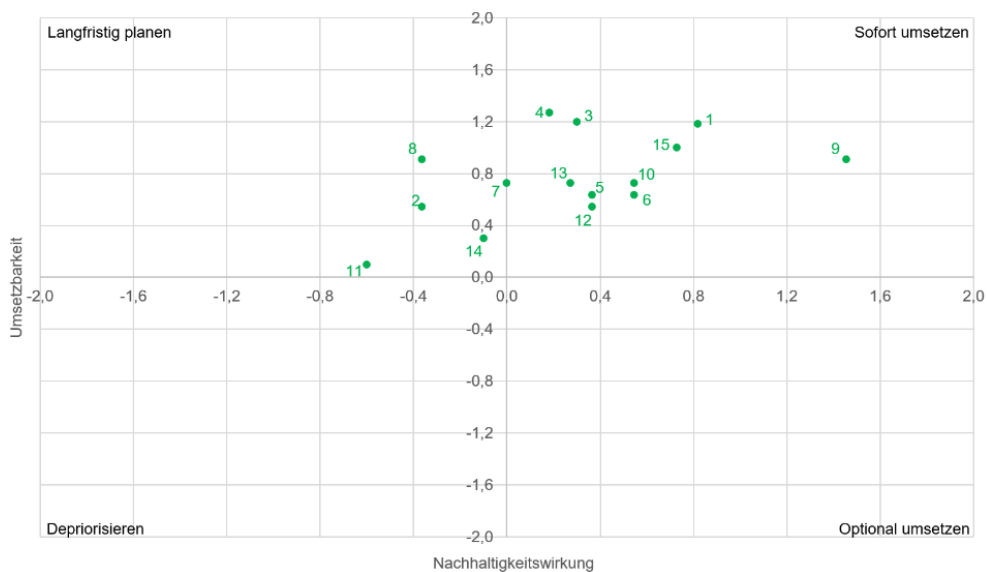


Abbildung 11: Bewertung der übergreifenden Umweltmaßnahmen

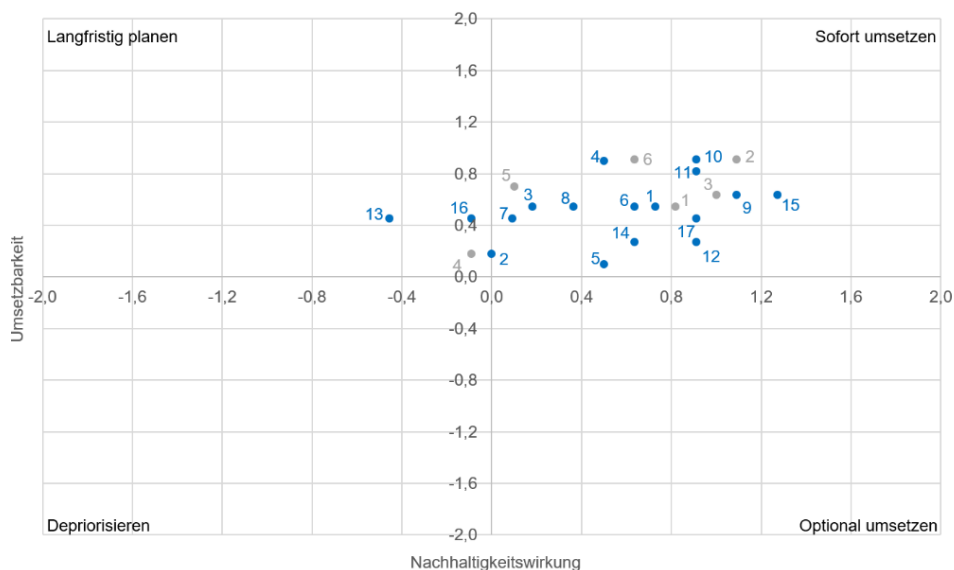


Abbildung 12: Bewertung der übergreifenden Sozial- und Governancemaßnahmen

Zu den als besonders wirksam bewerteten Umweltmaßnahmen zählt die „Reduzierung und Optimierung des Druckluftverbrauchs einschließlich Leckageprüfung“. Mit einer bewerteten Nachhaltigkeitswirkung von 1,18 und einer hohen Umsetzbarkeit leistet diese Maßnahme laut den Experten einen zentralen Beitrag zur Energieeinsparung und Effizienzsteigerung im Produktionsumfeld. Ebenfalls hervorzuheben ist der „Bezug von Ökostrom“, der einen hohen Umsetzbarkeitswert erhielt. Auch wenn die Nachhaltigkeitswirkung etwas niedriger ausfällt, trägt der Einsatz erneuerbarer Energien signifikant zur Dekarbonisierung der Produktion bei.

Im sozialen Bereich stechen zwei Maßnahmen besonders hervor. Die Maßnahme „Mitarbeiterorientierte Arbeitszeitmodelle wie Homeoffice, Gleitzeit oder die Reduzierung von Nachtschichten“ wurde von den Experten mit einer Umsetzbarkeit und Wirkung von jeweils 0,9091 bewertet. Die „Bereitstellung von

persönlicher Schutzausrüstung“ erreicht die höchste bewertete Umsetzbarkeit aller betrachteten Maßnahmen. Sie unterstützt aktiv den Arbeitsschutz und das Sicherheitsbewusstsein im Unternehmen.

Besonders hervorzuheben ist auf Governance-Ebene die „Etablierung eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP)“. Dieser Prozess fördert langfristig eine nachhaltige Veränderungskultur und die systematische Integration von Verbesserungsimpulsen in den Betriebsablauf. Darüber hinaus wurde insbesondere die Maßnahme „Klare und kommunizierte Nachhaltigkeitsstrategie“ als wirksam und gut umsetzbar bewertet.



Unternehmen, die auf zertifiziertem Ökostrom umsteigen, reduzieren ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Stromverbrauch, verbessern ihren Corporate Carbon Footprint und erfüllen damit zunehmend die gesetzlichen Nachhaltigkeitsanforderungen.



Flexible Arbeitsmodelle führen zu einer deutlich höheren Mitarbeiterzufriedenheit, zu einer geringeren Fluktuation und zu einer messbaren Reduzierung der Fehlzeiten. Aufgrund ihrer großen Potenziale halten flexible Arbeitsmodelle auch in Produktionsumgebungen zunehmend Einzug.



Ein systematischer KVP steigert nachweislich die Anzahl der Verbesserungsvorschläge pro Mitarbeitendem, senkt die Fehlerquote und steigert gleichzeitig die Produktivität. Zudem führt ein KVP zu einer höheren Identifizierung der Mitarbeitenden mit den Prozessabläufen.

## 5 Quantitative Analyse der Werkzeugemissionen

Die Anforderungen an Transparenz und Nachweisbarkeit von Klimaauswirkungen entlang industrieller Wertschöpfungsketten nehmen stetig zu. Auch der Werkzeugbau steht zunehmend vor der Aufgabe, seine Produkte und Prozesse im Hinblick auf ihre Klimawirkung transparent darzustellen. Ein zentrales Instrument hierfür ist der Product Carbon Footprint (PCF). Der PCF beschreibt die Summe aller CO<sub>2</sub>e-Emissionen, die entlang des Lebenszyklus eines Werkzeugs entstehen. Dabei steht CO<sub>2</sub>e für Kohlendioxid-Äquivalente und fasst nicht nur CO<sub>2</sub>, sondern auch andere Treibhausgase wie Methan (CH<sub>4</sub>) oder Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) zusammen, deren Klimawirkung in eine vergleichbare Größe umgerechnet wird.

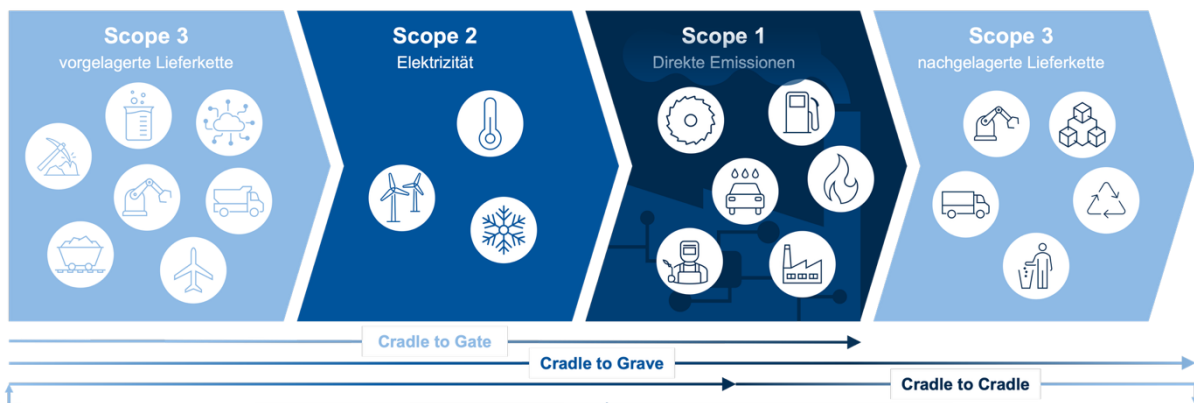


Abbildung 13: Scopes der Emissionsbilanzierung

Die erfassten CO<sub>2</sub>e-Emissionen gliedern sich nach dem Greenhouse Gas Protocol in drei Scopes (Ranganathan et al. 2004). Scope 1 umfasst alle direkten Emissionen aus Quellen innerhalb der Organisation, beispielsweise aus dem Betrieb eigener Maschinen oder firmeneigener Fahrzeuge. Scope 2 beinhaltet die indirekten Emissionen, die durch den Verbrauch eingekaufter Energie entstehen, insbesondere aus Strom-, Wärme- oder Kältenutzung. Scope 3 umfasst schließlich sämtliche weiteren indirekten Emissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette: von der Gewinnung der Rohmaterialien über Transport- und Beschaffungsprozesse bis hin zur Nutzung, Wartung und Entsorgung der Produkte.

Um den CO<sub>2</sub>e-Fußabdruck eines Werkzeugs systematisch zu erfassen, ist die Festlegung der betrachteten Systemgrenzen von zentraler Bedeutung. Sie bestimmen, welche Lebenszyklusphasen in die Analyse einbezogen werden und in welchem Umfang die Klimawirkung sichtbar wird. Der Cradle-to-Gate Ansatz beschreibt die Emissionen von der Rohstoffgewinnung über die einzelnen Produktionsschritte bis zu dem Punkt, an dem das fertige Werkzeug den Werkzeugbaubetrieb verlässt. Der Cradle-to-Grave Ansatz erweitert die Analyse auf den gesamten Lebenszyklus des Werkzeugs. Neben der Produktion werden auch die Nutzungsphase sowie die Entsorgung am Lebensende berücksichtigt. Damit lassen sich umfassendere Aussagen zur Gesamtauswirkung auf die Umwelt und das Klima treffen. Der Cradle-to-Cradle Ansatz geht noch einen Schritt weiter und umfasst zusätzlich das Ende des Produktlebenszyklus bspw. in Form einer Wiederaufbereitung.

Die drei Ansätze bieten unterschiedliche Vor- und Nachteile. Der Cradle-to-Gate Ansatz eignet sich besonders, wenn die Betrachtung auf die Herstellungsphase fokussiert ist, um den CO<sub>2</sub>e-Fußabdruck von Produkten zu bewerten. Eine schematische Übersicht der Scopes verdeutlicht diese Systematik und zeigt die jeweiligen Emissionsquellen entlang des Lebenszyklus (vgl. Abbildung 8).

Im Rahmen des Projekts SustainTool wurde die PCF-Analyse eingesetzt, um zentrale Emissionstreiber sowie die Gesamtemissionen von Werkzeugen zu identifizieren. Ziel war es, den aktuellen Status der Werkzeugemissionen messbar zu machen, Transparenz über die relevanten Einflussfaktoren zu schaffen und konkrete Ansatzpunkte für Verbesserungen aufzuzeigen. Dadurch erhalten Unternehmen nicht nur ein klares Bild ihrer eigenen Klimawirkung, sondern auch eine belastbare Grundlage für eine gezielte Weiterentwicklung und Maßnahmen zur Emissionsreduktion.

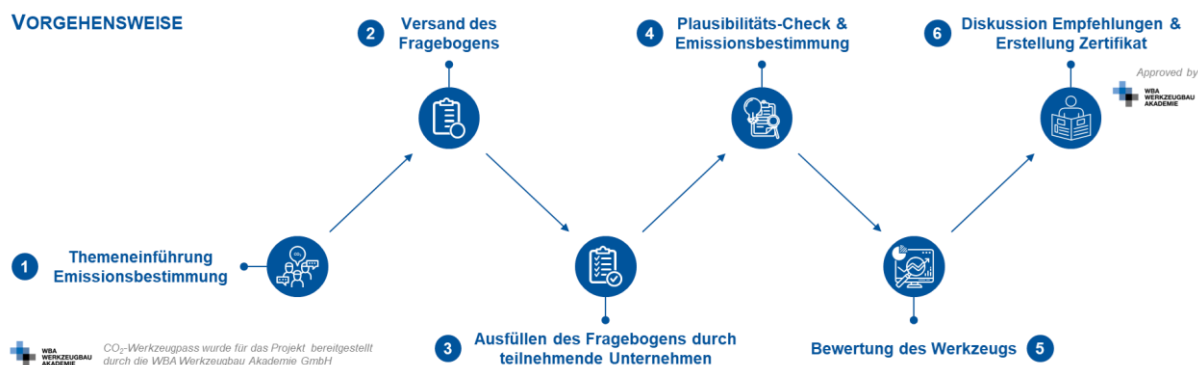


Abbildung 14: Vorgehen der PCF-Analyse

Die Durchführung der PCF-Analyse erfolgt in einem klar strukturierten Ablauf, der in Abbildung 14 dargestellt ist. Zunächst erfassen die teilnehmenden Unternehmen alle relevanten Verbräuche und Zukaufteile mithilfe des TÜV-zertifizierten PCF-Tools CO<sub>2</sub>-Werkzeugpass des Projektpartners WBA Werkzeugbau Akademie Aachen. Dazu zählen Energie, Betriebsmittel, Rohmaterialien, Normalien und Transporte. Anschließend prüft ein Plausibilitätscheck die Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit der Daten. Die Emissionen werden entlang der Scopes 1-3 kategorisiert und mit dem CO<sub>2</sub>-Werkzeugpass ausgewertet. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die gemeinsame Diskussion mit den Unternehmen, aus der konkrete Handlungsempfehlungen zur Emissionsreduktion abgeleitet werden. Den Abschluss bildet ein Zertifikat, das die erhobenen Werte und die zugrunde liegende Methodik offiziell bestätigt. Dieses Zertifikat kann beispielsweise den Kunden des Werkzeugbaus präsentiert werden.

Der CO<sub>2</sub>-Werkzeugpass von der WBA Werkzeugbau Akademie GmbH dient als Instrument zur Berechnung des Product Carbon Footprint (PCF) von Werkzeugen. Grundlage ist die strukturierte Erfassung aller relevanten Daten zu Energie- und Materialverbräuchen, Zukaufteilen, Transporten sowie internen und externen Prozessschritten. Die zugrunde liegende Berechnungslogik ist nach ISO 14067:2018 zertifiziert. Diese Zertifizierung bestätigt die Konformität mit den internationalen Standards und gewährleistet Transparenz, Vergleichbarkeit und Glaubwürdigkeit der Ergebnisse. Damit ermöglicht der CO<sub>2</sub>-Werkzeugpass eine international anerkannte und fundierte Bilanzierung der CO<sub>2</sub>e- Emissionen für die Werkzeugherstellung.



Abbildung 15: Übersicht über die Emissionen im CO<sub>2</sub>-Werkzeugpass

## 5.1 Ergebnisse der quantitativen Analyse der Werkzeugemissionen

Die quantitative Analyse der Werkzeugemissionen liefert erstmals eine datenbasierte Grundlage zur Bewertung der Klimawirkung typischer Spritzgusswerkzeuge im Werkzeugbau. Ziel war es, Transparenz über die relevanten Emissionstreiber in der Werkzeugherstellung zu schaffen und ein realistisches Branchenbild zu generieren.

<b>Analyserahmen</b>	Bereich <b>Cradle-to-Gate</b>	Periode <b>2024</b>	Methodik <b>ISO 14067</b>
<b>Durchschnittliches Unternehmen</b>	Mitarbeitende <b>82,4</b>	Betriebsstunden <b>50.085,6 h</b>	Eigenkosten <b>8,3 Mio. €</b>
<b>Durchschnittliches Spritzgusswerkzeug</b>	Gewicht <b>1.564 kg</b>	Eigenkosten <b>103.000 €</b>	Eigenkostenanteil <b>1,7 %</b>

Abbildung 16: Zahlen, Daten, Fakten des Betrachtungsbereichs für die PCF-Analyse

Die in Abbildung 16 dargestellten Kennzahlen repräsentieren das durchschnittlich untersuchte Spritzgusswerkzeug sowie das durchschnittliche Unternehmen der Stichprobe. Die beteiligten Unternehmen stammen aus Deutschland und Österreich und repräsentieren typische Strukturen der Branche. Berücksichtigt wurden sowohl interne Werkzeugbaubetriebe in größeren Produktionsorganisationen als auch unabhängige externe Betriebe. In den betrachteten Werkzeugbaubetrieben waren zwischen 10 und 150 Mitarbeitenden tätig. Im Durchschnitt lagen die jährlichen Eigenkosten der analysierten Unternehmen bei rund 8,3 Mio. € bei 82 Mitarbeitenden, während ein durchschnittliches Werkzeug Kosten von 103.000 € und ein Gewicht von 1.564 kg aufwies. Diese Kennzahlen bilden den ökonomischen und physischen Bezugsrahmen für die Einordnung der Emissionsergebnisse.

Zur Wahrung der Anonymität der beteiligten Betriebe und zur besseren Vergleichbarkeit wurden Mittelwerte gebildet, die als Referenzrahmen für die Emissionsanalyse dienen. Damit lassen sich die Ergebnisse unabhängig von individuellen Unternehmensgrößen und Werkzeugausprägungen einordnen und in Relation setzen.

### 5.1.1 Emissionen eines durchschnittlichen Spritzgusswerkzeugs

Das durchschnittlich untersuchte Spritzgusswerkzeug verursacht im Cradle-to-Gate-Betrachtungsrahmen Gesamtemissionen von 13.281 kg CO<sub>2</sub>e. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Ergebnisse auf verschiedene Bezugsgrößen normiert. Bezogen auf das Werkzeuggewicht entspricht dies 13,78 kg CO<sub>2</sub>e pro Kilogramm, während die Emissionen in Relation zu den Eigenkosten bei 0,11 kg CO<sub>2</sub>e pro Euro liegen. Auf die eingesetzten Betriebsstunden normiert ergibt sich ein Wert von 17,07 kg CO<sub>2</sub>e pro Stunde.



<sup>1</sup>: Emissionen je Betriebsstunde berechnet über Gesamtbetriebsstunden und dem Werkzeuganteil

Abbildung 17: Zentrale Kennzahlen der Emissionsanalyse

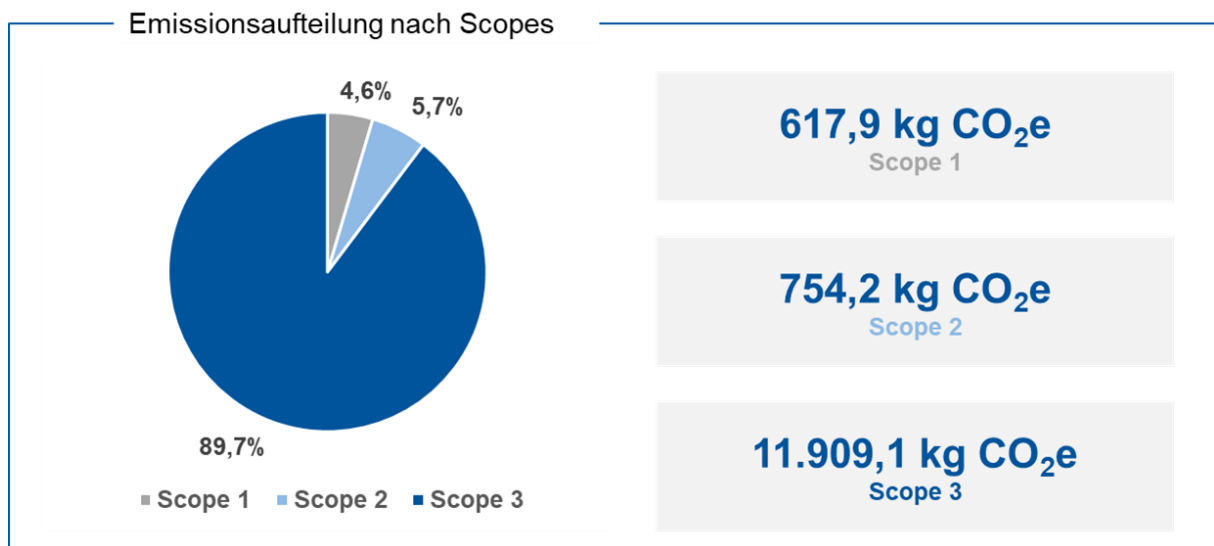


Abbildung 18: Emissionsaufteilung nach Scopes

Die Aufteilung der Emissionen nach den Kategorien des GHG-Protokolls zeigt ein klares Muster (vgl. Abbildung 18). Mit 89,7 % stellen die Scope-3-Emissionen den weitaus größten Anteil am CO<sub>2</sub>e-Fußabdruck dar. Diese entstehen überwiegend durch die Beschaffung von Halbzeugen und Zukaufteilen und sind damit stark materialgetrieben. Scope-1-Emissionen entstehen aus direkten Quellen innerhalb des Unternehmens, beispielsweise durch den Betrieb von Gasheizungen oder den Einsatz firmeneigener Verbrennerfahrzeuge, und machen im Durchschnitt etwa 4,6 % der Gesamtemissionen aus. Scope-2-Emissionen, die auf den Verbrauch von eingekaufter Energie, wie z. B. Strom, Wärme oder Kälte, zurückgehen, liegen im Durchschnitt bei 5,7 %. Auffällig ist, dass die relativen Anteile zwischen den untersuchten Unternehmen weitgehend konstant bleiben. Eine Verschiebung der Anteile ist zu beobachten, wenn der Anteil erneuerbarer Energien im Strommix gering ist. In diesen Fällen steigt der Anteil der Scope-2-Emissionen deutlich an und unterstreicht den Einfluss der Energieversorgung auf die Gesamtbilanz des Werkzeugs. Emissionen aus der vorgelagerten Lieferkette der Stromerzeugung (z. B. Bau von Windkraftanlagen, Herstellung von Solarmodulen, Wartung von Netzinfrastruktur) werden nicht in Scope 2 erfasst, sondern in Scope 3.

## 5.1.2 Unterschiede in der Emissionsverteilung

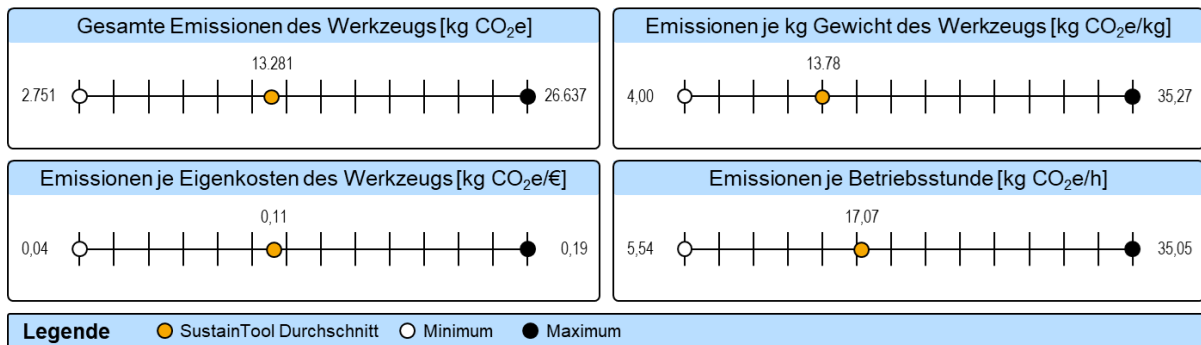


Abbildung 19: Verteilungen der Emissionen

Abbildung 19 zeigt die Bandbreite der ermittelten Emissionskennzahlen der fünf untersuchten Werkzeuge. Dargestellt sind jeweils die Minimal-, Maximal- und Durchschnittswerte des SustainTool-Datensatzes für verschiedene Bezugsgrößen, gesamten Emissionen, Emissionen je Euro Eigenkosten, je Kilogramm Werkzeuggewicht sowie je Betriebsstunde.

Die Auswertung verdeutlicht eine erhebliche Streuung der Emissionswerte. Sowohl die Gesamtemissionen als auch die Werte je Euro Eigenkosten, je Kilogramm Werkzeuggewicht und je Betriebsstunde unterscheiden sich teils um ein Vielfaches. Diese Unterschiede spiegeln die Heterogenität der betrachteten Werkzeuge wider. Faktoren wie Werkzeuggröße, geometrische Komplexität, Materialeinsatz sowie die Produktionsbedingungen im jeweiligen Unternehmen wirken sich unmittelbar auf die Klimabilanz aus. Das Gewicht der betrachteten Werkzeuge variiert von 78 kg bis 3.550 kg. Während die Gesamtemissionen einzelner Werkzeuge stark variieren, zeigen die normierten Kennzahlen, dass die ökonomische und physische Einordnung eine höhere Vergleichbarkeit ermöglicht.

## 5.2 Fazit der Emissionsanalyse

Die Analyse zeigt eindeutig, dass der Materialeinsatz der mit Abstand wichtigste Emissionstreiber in der Werkzeugherstellung ist. Die Herstellung und Beschaffung von Halbzeugen, Normalien und Rohmaterialien verursachen den Großteil der Gesamtemissionen. Entsprechend groß ist das Reduktionspotenzial durch eine materialeffiziente Konstruktion, den gezielten Aufbau einer Kreislaufwirtschaft und eine engere Zusammenarbeit mit Lieferanten, um CO<sub>2</sub>e-ärmere Materialien im Werkzeugbau zu nutzen.

Einen weiteren, wenn auch kleineren Einfluss hat der Energieverbrauch in der mechanischen Fertigung. Hier bieten der Bezug von Ökostrom, der Einsatz energieeffizienter Maschinen und die Nutzung von Abwärme direkte Hebel zur Reduktion der Scope-2-Emissionen. Die direkten betrieblichen Emissionen (Scope 1) spielen im Vergleich eine untergeordnete Rolle, sollten jedoch insbesondere im Bereich Fahrzeugflotte und Heizungssysteme durch alternative Energieträger und eine effiziente Betriebsführung weiter reduziert werden.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Nachhaltigkeitsleistung eines Werkzeugbaus nicht allein durch interne Prozesse bestimmt wird. Vielmehr erfordert eine signifikante CO<sub>2</sub>e-Reduktion eine ganzheitliche Betrachtung der Lieferkette, eine transparente Datenerfassung und die konsequente Nutzung von Kennzahlen, um Fortschritte messbar zu machen. Unternehmen, die frühzeitig in Materialeffizienz, Energieoptimierung und Lieferkettenmanagement investieren, können ihren ökologischen Fußabdruck erheblich senken und zugleich ihre Wettbewerbsfähigkeit langfristig sichern.

## 6 Systematische Steigerung der Nachhaltigkeit in der Werkzeugherstellung

Die vorangegangenen Kapitel haben zentrale Einflussfaktoren und Maßnahmen zur Steigerung der Nachhaltigkeit im Werkzeugbau aufgezeigt. Dieses Kapitel fasst diese Erkenntnisse zusammen und leitet daraus ein Vorgehensmodell ab, das Unternehmen als Orientierung bei der systematischen Steigerung der Nachhaltigkeit dient. Abbildung 20 bündelt die wesentlichen Elemente für die Umsetzung einer nachhaltigen Werkzeugherstellung und zeigt ein strukturiertes Modell, das die zuvor beschriebenen Analysen, Handlungsfelder und Maßnahmen zu einer praxisnahen Unternehmensleitlinie zusammenführt.

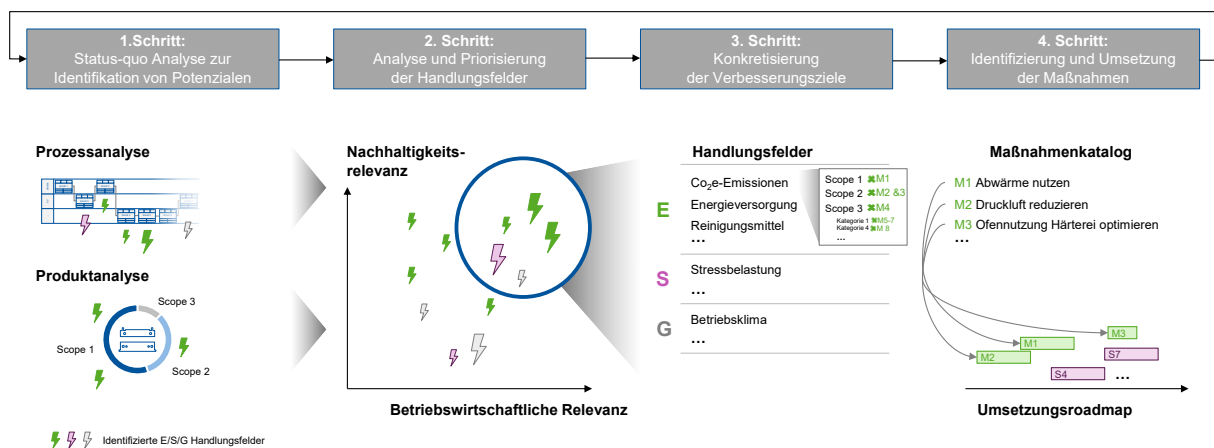


Abbildung 20: Vorgehensmodell für die systematische Steigerung der Nachhaltigkeit in der Werkzeugherstellung

Im ersten Schritt, der Status-quo-Analyse, werden die unternehmensspezifischen Prozesse der Werkzeugherstellung hinsichtlich ihrer ESG-Aspekte untersucht und durch eine produktbezogene Bewertung, beispielsweise in Form eines Product Carbon Footprints (PCF), ergänzt. Durch die Kombination aus Prozessanalyse und PCF können die wesentlichen Emissionsquellen, Materialverbräuche und organisatorischen Einflussfaktoren und Nachhaltigkeitspotenziale identifiziert werden. Nachhaltigkeitspotenziale beschreiben Verbesserungsmöglichkeiten, durch die sich die ökologischen, sozialen oder ökonomischen Wirkungen eines Unternehmens gezielt positiv beeinflussen lassen.

Im zweiten Schritt, der Analyse und Priorisierung der Handlungsfelder, werden die zuvor identifizierten Potenziale zu übergeordneten Handlungsfeldern zusammengeführt. Diese Handlungsfelder werden anschließend sowohl hinsichtlich ihrer nachhaltigkeitsbezogenen als auch ihrer betriebswirtschaftlichen Relevanz bewertet. Das Ergebnis ist eine priorisierte Übersicht über Handlungsfelder, in denen Maßnahmen den größten Nutzen entfalten können.

Im dritten Schritt, der Konkretisierung der Verbesserungsziele, werden für die priorisierten Handlungsfelder realistische Ziele formuliert. Diese Ziele bilden die Grundlage für die spätere Maßnahmenentwicklung und stellen sicher, dass ökologische, soziale und ökonomische Zielsetzungen klar definiert und operationalisiert werden. In der Folge können Ressourcen gezielt eingesetzt werden, um die Fokusthemen zu bearbeiten. Die Definition von Soll-Werten für ausgewählte Kennzahlen unterstützt dabei, indem sie eine Messbarkeit und Erfolgskontrolle der Zielerreichung ermöglicht.

Im vierten Schritt, der Identifizierung und Umsetzung von Maßnahmen, werden wirkungsvolle Maßnahmen abgeleitet, die zur Zielerreichung beitragen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass einzelne Maßnahmen gleichzeitig mehrere Nachhaltigkeitsziele beeinflussen können. Zur Auswahl geeigneter und

umsetzbarer Maßnahmen kann der in Kapitel 4 vorgestellte Maßnahmenkatalog genutzt werden, der konkrete Beispiele und praxisnahe Ansatzpunkte enthält. Die ausgewählten Maßnahmen werden anschließend in einer Umsetzungsroadmap zeitlich priorisiert und den verantwortlichen Bereichen zugeordnet. Dadurch entsteht ein klar strukturierter Handlungsplan, der die Umsetzung im Unternehmen systematisch unterstützt.

Das Vorgehensmodell ist als kontinuierlicher Verbesserungsprozess ausgelegt. Durch eine fortlaufende Bewertung der Nachhaltigkeitsleistung können Fortschritte regelmäßig kontrolliert, Maßnahmen bei Bedarf angepasst und neue Potenziale identifiziert werden. Unternehmen verankern so Nachhaltigkeit langfristig und systematisch in ihrer Werkzeugherstellung. Gleichzeitig erhalten sie eine Orientierung für zukünftige Investitionen und organisatorische Entscheidungen. Auf diese Weise wird Nachhaltigkeit nicht als Einzelmaßnahme, sondern als integraler Bestandteil der Unternehmensentwicklung etabliert.

## Exkurs: Vergleichsdaten zu typischen Emissionsquellen

Die bisherigen Analysen machen deutlich, dass ein erheblicher Teil der Emissionen nicht unmittelbar in der direkten Werkzeugherstellung entsteht. Gleichzeitig zeigt sich, dass viele dieser Emissionen durch betriebliche Entscheidungen aus unterschiedlichen Bereichen des Werkzeugbaus beeinflusst werden können. Mobilität, Energieversorgung, Gebäudetechnik, Lieferanten- und Materialauswahl zählen dabei zu den Treibern mit dem größten Einfluss.

Der folgende Exkurs zeigt anhand alltagsnaher Beispiele wie stark sich verschiedene Entscheidungen auf den CO<sub>2</sub>e-Fußabdruck auswirken können. Die dargestellten Vergleichswerte verdeutlichen, dass die gesamte Organisation emissionsrelevante Entscheidungen trifft. Nachhaltigkeit ist somit ein übergreifendes Thema, das weit über den Werkzeugbau hinweg relevant ist. Die Klimawirkung verschiedener Arten von Stromquellen, Verkehrsmitteln, Heizsystemen und Rohmaterialien kann sich um ein Vielfaches unterscheiden. Werkzeugbaubetriebe sollten sich daher auf diejenigen Alternativen konzentrieren, die den größten Beitrag zur Klimawirkung leisten und gleichzeitig eine hohe Umsetzbarkeit aufweisen. Die folgenden vier Übersichten liefern Vergleichswerte, die einen quantitativen Blick auf die zentralen Emissionsquellen ermöglichen:

### Verkehrsemissionen

Mobilität ist einer der größten Hebel für individuelle CO<sub>2</sub>e-Einsparungen. Die Abbildung 21 macht deutlich: Fahrrad, E-Bike und Fernzüge sind klimafreundliche Alternativen, während Autofahrten und insbesondere Flugreisen zu den emissionsintensivsten Mobilitätsformen gehören.

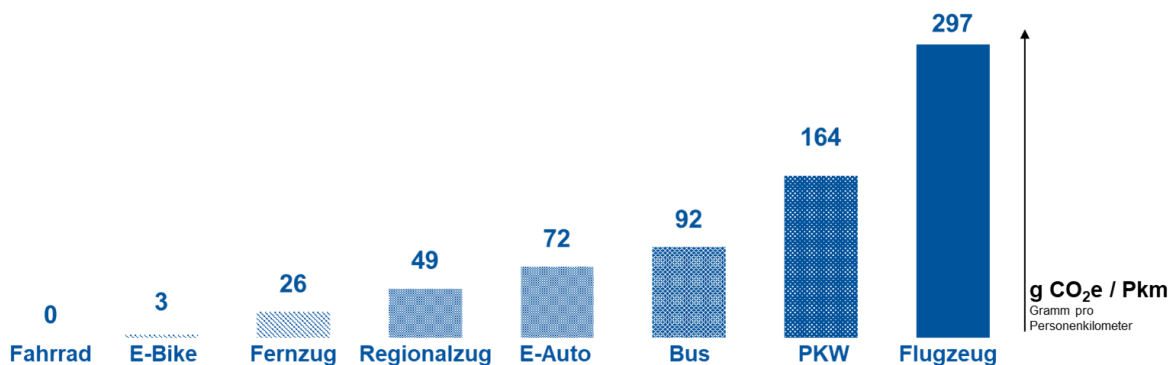


Abbildung 21: CO<sub>2</sub>e-Emissionen bei der Nutzung verschiedener Verkehrsmittel (Umweltbundesamt 2025)

Für Unternehmen bedeutet dies, dass sie durch eine bewusste Gestaltung der Geschäftsreisen und Transportlogistik, etwa durch den verstärkten Einsatz der Bahn, von Fahrgemeinschaften oder digitalen Meetings, einen unmittelbaren Beitrag zur Reduktion ihrer betrieblichen Emissionen leisten können.

### Heizungsemissionen

Heizungsemissionen zählen zu den zentralen Einflussfaktoren im Gebäudebereich und machen einen erheblichen Anteil am gesamten Energieverbrauch aus. Auch innerhalb des Gebäudebereichs gibt es große Unterschiede: Einfamilienhäuser mit Wärmepumpe, die mit Ökostrom betrieben wird, verursachen nur einen Bruchteil der Emissionen von Häusern, die mit fossilen Heizsystemen wie z. B. Erdgas- und Ölheizungen ausgestattet sind. In Österreich ist die Fernwärme deutlich weiter verbreitet als in Deutschland. In Deutschland werden zum Heizen noch in circa 55 % der Fälle Erdgas und in circa 19 % der Fälle Heizöl als Energieträger verwendet (Bdew 2025).

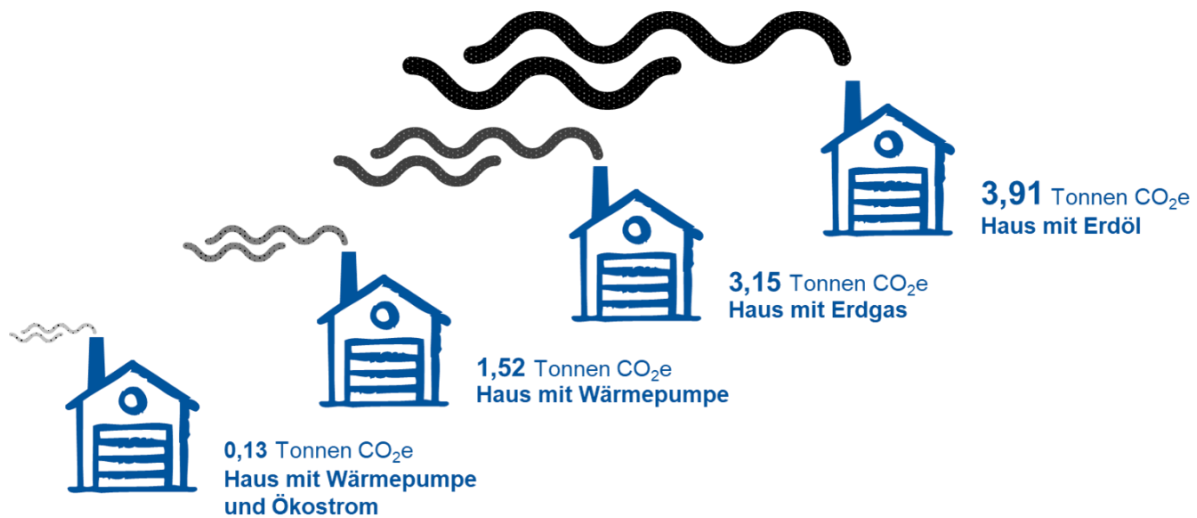


Abbildung 22: CO<sub>2</sub>e-Emissionen nach Heizungsart für ein 4-Personen-Haushalt (25.000 kWh/Jahr) (Umweltbundesamt 2025)

### Emissionen bei der Stromerzeugung

Die Energieerzeugung zählt weltweit zu den größten Quellen von Treibhausgasemissionen und beeinflusst somit direkt die Klimabilanz von Unternehmen. Die folgende Übersicht zeigt die Unterschiede der CO<sub>2</sub>e-Emissionen pro erzeugter Kilowattstunde Strom je nach Energiequelle. Vor allem Braunkohlekraftwerke liegen mit Abstand an der Spitze der Emissionsintensität und verdeutlichen den Unterschied zu nahezu klimaneutralen Quellen wie Wind- oder Solarenergie. Besonders auffällig ist der Vergleich zwischen Deutschland und Österreich. Während der österreichische Strommix aufgrund des hohen Anteils an Wasserkraft deutlich geringere Emissionen verursacht, prägen in Deutschland fossile Energieträger wie Erdgas noch immer die Klimabilanz.

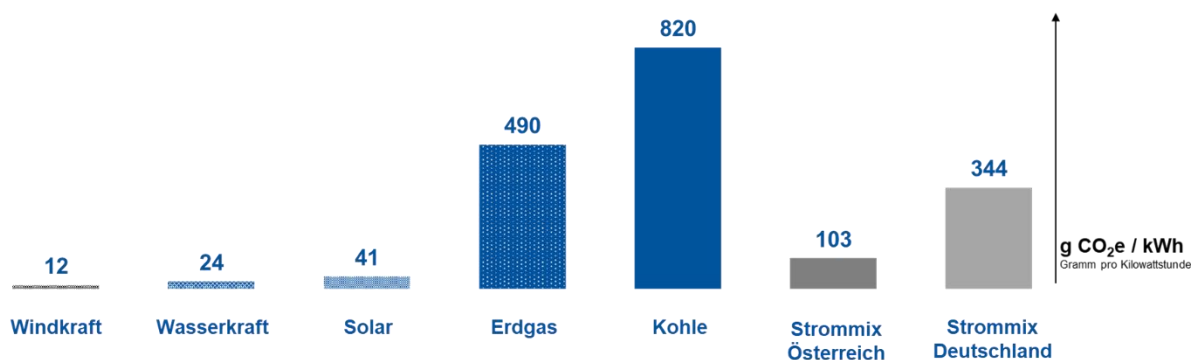


Abbildung 23: CO<sub>2</sub>e-Emissionen pro erzeugter Kilowattstunde Strom je Energiequelle und im Schnitt in Deutschland und Österreich im Jahr 2024 (Schlömer S. et al. 2025; Statista 2025c)

Für Unternehmen bedeutet dies, dass der Bezug von Ökostrom und die Investition in erneuerbare Energiequellen nicht nur die eigenen Scope-2-Emissionen deutlich reduzieren, sondern auch einen wichtigen Beitrag zur Erfüllung zukünftiger Nachhaltigkeitsanforderungen leisten.

## Emissionen der Rohmaterialien

Die Herstellung metallischer Werkstoffe zählt zu den energieintensivsten industriellen Prozessen und ist ein wesentlicher Faktor für die globalen CO<sub>2</sub>e-Emissionen. Die folgende Abbildung 24 zeigt die CO<sub>2</sub>e-Emissionen, die bei der Produktion von einem Kilogramm verschiedener Metalle entstehen. Auffällig sind die enormen Unterschiede zwischen Primär- und Sekundärproduktion: So verursacht recycelter Stahl, Kupfer oder Aluminium vergleichsweise geringe Emissionen, während der Fußabdruck bei der Primärproduktion deutlich höher ausfällt. Aluminium weist mit fast 12 kg CO<sub>2</sub>e pro Kilogramm einen besonders hohen Wert auf und verdeutlicht, wie energieintensiv die Gewinnung bestimmter Rohstoffe ist. Zudem variieren die Emissionen stark in Abhängigkeit vom spezifischen Material, seiner Zusammensetzung, dem Standort der Produktion und den eingesetzten Herstellungsverfahren.

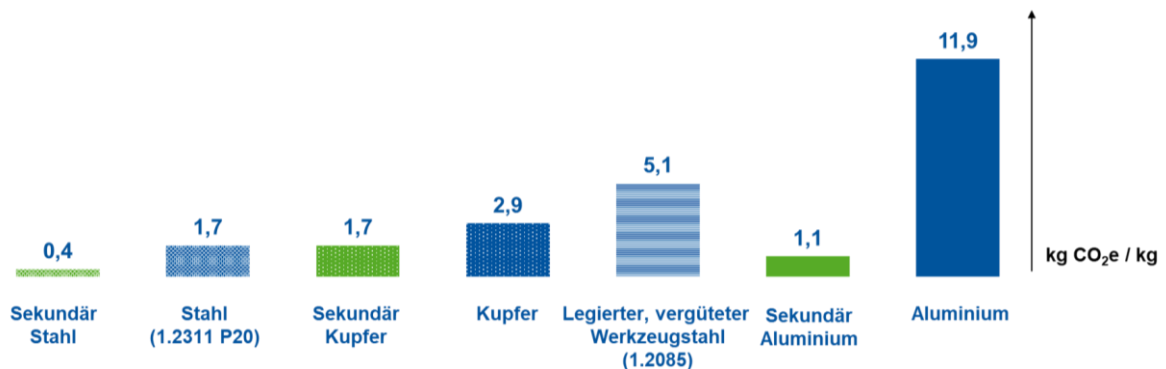


Abbildung 24: CO<sub>2</sub>e-Emissionen je Rohmaterial (Umweltbundesamt 2024)

Für Unternehmen bedeutet dies, dass die gezielte Auswahl von Materialien und die Nutzung von Sekundärrohstoffen erhebliche Potenziale zur Reduktion des CO<sub>2</sub>e-Fußabdrucks bieten, insbesondere in materialintensiven Bereichen wie dem Werkzeug- und Formenbau.

## Literaturverzeichnis

- Bdew (2025): BDEW-Studie „Wie heizt Deutschland 2023?“. Stand 2023. Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/energie/studie-wie-heizt-deutschland/>, zuletzt aktualisiert am 28.08.2025, zuletzt geprüft am 28.08.2025.
- BMW Group (Hg.) (2024): BMW Group Bericht 2024. Online verfügbar unter <https://www.bmwgroup.com/de/bericht/2024/index.html>, zuletzt geprüft am 27.07.2025.
- Boos, Wolfgang; Kelzenberg, Christoph; Prümmer, Marcel; Goertz, David; Boshof, Julian; Horstkotte, Rainer et al. (2022): Tooling in Germany. Aachen: WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH.
- European Commission (2022): Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD). DIRECTIVE (EU) 2022/2464. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2464>.
- Eurostat (2024): Statistics on the production of manufactured goods. Sold production, exports and imports (ds-056120). Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ds-056120\\_\\_custom\\_17893841/default/table](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ds-056120__custom_17893841/default/table), zuletzt aktualisiert am 24.07.2025.
- Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerke (2023): Praxis-Leitfaden für Energieeffizienz- und Klimaschutz- Netzwerke. Hg. v. BMWK.
- Ranganathan, Janet; Laurent Corbier; Pankaj Bhatia; Simon Schmitz; Peter Gage (2004): The Greenhouse Gas Protocol. Rev. ed. A Corporate Accounting and Reporting Standard. In: *World Resources Institute*, S. 1–116. Online verfügbar unter <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>.
- Schlömer S.; T. Bruckner; L. Fulton; E. Hertwich; A. McKinnon; D. Perczyk et al. (2025): Technology-specific Cost and Performance Parameters. IPCC. Online verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/technology-specific-cost-and-performance-parameters/>, zuletzt aktualisiert am 29.08.2025, zuletzt geprüft am 29.08.2025.
- Statista (2025a): ETS carbon price expectations by system 2022-2030. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/1334906/average-carbon-price-projections-worldwide-by-region/>, zuletzt aktualisiert am 20.07.2025, zuletzt geprüft am 20.07.2025.
- Statista (2025b): EU-Emissionshandel: Entwicklung der Preise 2025. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1454492/umfrage/co2-preise-im-emissionshandels-system-der-eu/>, zuletzt aktualisiert am 20.07.2025, zuletzt geprüft am 20.07.2025.
- Statista (2025c): CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Stromerzeugung in der EU 2024| Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1009521/umfrage/co2-emissionen-durch-stromerzeugung-in-der-eu/>, zuletzt aktualisiert am 29.08.2025, zuletzt geprüft am 29.08.2025.
- Stefan Willeke (2015): Energiekosten sparen ohne teure Investitionen. Produktionstechnik Hannover informiert. In: *Produktionstechnik Hannover informiert*, 01.12.2015. Online verfügbar unter <https://phi-hannover.de/energiekosten-sparen-ohne-teure-investitionen/>, zuletzt geprüft am 20.03.2025.
- Umweltbundeamt (2025): CO<sub>2</sub>-Rechner des Umweltbundesamtes. Online verfügbar unter [https://uba.co2-rechner.de/de\\_DE/calculator/housing/](https://uba.co2-rechner.de/de_DE/calculator/housing/), zuletzt aktualisiert am 28.08.2025, zuletzt geprüft am 28.08.2025.

Umweltbundesamt (2024): Treibhausgasemissionen. Probas. Online verfügbar unter <https://www.probas.umweltbundesamt.de/einblick/#/>, zuletzt aktualisiert am 13.11.2024, zuletzt geprüft am 29.08.2025.

Umweltbundesamt (2025): Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr. Bezugsjahr 2023. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/bild/vergleich-der-durchschnittlichen-emissionen>, zuletzt aktualisiert am 28.08.2025, zuletzt geprüft am 28.08.2025.

VW (2022): Kapitel Dekarbonisierung des Nachhaltigkeitsberichtes, zuletzt geprüft am 20.02.2025.

WZL & IPT Aachen (2024): Gemeinsame Datenbank Werkzeugbau. EiP: WZL & IPT.