

Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik
Universität Bayreuth

**Ressourceneffizienzsteigerung durch Visualisierung von Abläufen und
Einbindung der Mitarbeiterverantwortung**

Resource Efficiency through Visualisation and Employee's Responsibility (REVisER)

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 29897/01-210 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper, Dipl.-Ing. Mark Andre Nix,
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Martin Süchting, M. Sc. Arnim Reger

Bayreuth, Dezember 2014

• **Projektkennblatt**
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	29897	Referat	Fördersumme	217.556 €
Antragstitel		Ressourceneffizienzsteigerung durch Visualisierung von Abläufen und Einbindung der Mitarbeiterverantwortung		
Stichworte		Ressourceneffizienz, Materialeffizienz, Energieeffizienz, Produktion, Mitarbeitermotivation, Visualisierung		
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
18 Monate	01.02.2013	31.07.2014	1	
Zwischenberichte	07.2014 04.2013 09.2013	03.2014 06.2013 12.2013		
Bewilligungsempfänger		Universität Bayreuth Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik Universitätsstraße 30 95447 Bayreuth		Tel 0921/55-7301 Fax 0921/55-7305 Projektleitung Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper Bearbeiter
Kooperationspartner		Forschungsinstitut Betriebliche Bildung GmbH / Nürnberg Lauterbach-Kießling GmbH / Seybothenreuth Federnfabrik Dietz GmbH / Neustadt Klubert + Schmidt GmbH / Pottenstein Sebald & Co. GmbH / Marktrechwitz Wibond Informationssysteme GmbH / Parkstein		
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens				
Diverse Studien und Forschungsprojekte wie z.B. M4E, haben gezeigt, dass neben der Durchführung von technischen Maßnahmen, die Erhöhung der Motivation und der Achtsamkeit der Mitarbeiter ein erfolgsversprechender Ansatzpunkt zur Steigerung der Material- und Energieeffizienz in produzierenden Unternehmen ist. Das Forschungsprojekt REVisER zielt auf die Identifikation und die Realisierung dieser Effizienzpotentiale ab.				
Ziel des Forschungsprojekts ist es, ein Maßnahmenengerüst zur nachhaltigen Implementierung von material- und energieeffizientem Verhalten der Produktionsmitarbeiter durch geeignete Visualisierungstechniken und Motivationsprinzipien zu entwickeln. Dieses Maßnahmenengerüst wird für produzierende Unternehmen ein Instrument sein, um die Aufmerksamkeit des Personals gezielt auf den Ressourceneinsatz zu richten. Dies wird Unternehmen u.a. ermöglichen, eigenes Einsparpotential aufzudecken, zu quantifizieren und Mitarbeiter mit handlungsleitender sowie komparativer Visualisierung zur freiwilligen Unterstützung der Ressourceneffizienzziele in ihrem direkten Umfeld anzuregen. Zum Projektabschluss werden die Ergebnisse in einem Leitfaden zusammengefasst.				
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden				
Im Rahmen des Projekts wurden zunächst in den ersten Arbeitspaketen der Status-Quo hinsichtlich der Mitarbeitermotivation in den teilnehmenden Unternehmen bestimmt sowie die Ressourcenverwendungen in einzelnen Produktionsprozessen identifiziert. Darauf folgend wurden die Einflussmöglichkeiten der Mitarbeiter ermittelt und konkrete Optimierungsmaßnahmen durch Motivationsprinzipien und Visualisierungstechniken für die einzelnen Unternehmen entwickelt, pilothaft implementiert und validiert. Anschließend wurde eine allgemeingültige Motivations- und Visualisierungssystematik abgeleitet und in einem Leitfaden zusammengefasst. Die nachfolgende Abbildung zeigt das Vorgehen im Überblick:				
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de				



Abbildung 1: Arbeitspakete des Projektes REVisER

Ergebnisse und Diskussion

Arbeitspaket 1

Zur Beurteilung des Status-Quo der Mitarbeitermotivation bei den teilnehmenden Unternehmen wurde ein Erhebungsbogen mit insgesamt 17 verschiedenen Ausprägungen der Motivation mit jeweils 10 Fragen erstellt und ausgewertet. Als Ergebnis dieses Arbeitspaketes (AP) kann festgehalten werden, dass es in den ausgewählten Ausprägungen der Motivation keine signifikanten Unterschiede der einzelnen Unternehmen gibt.

Die Bearbeitung des AP 1 ist abgeschlossen.

Arbeitspaket 2

In allen teilnehmenden Unternehmen wurden die Materialverbräuche mittels Stoff- und Wertstromanalysen untersucht. Diese dienen der unternehmensübergreifenden Analyse zum Auffinden von Optimierungsansätzen in der Produktion sowie der Dokumentation der erfassten Daten. Basierend auf den Erkenntnissen der Stoff- und Wertstromanalyse sowie den durchgeführten Interviews mit Mitarbeiter wurden Potentiallisten für die einzelnen Unternehmen erstellt. Diese Ergebnisse fließen anschließend in AP 3 ein.

Die Energieeffizienzpotentiale wurden bei allen teilnehmenden Unternehmen durch enge Zusammenarbeit mit den Produktionsexperten analysiert. Auf Basis dieses Expertenwissens wurden im Anschluss Messungen an den erfolgversprechendsten Stellen im Unternehmen vor Ort durchgeführt und grafisch ausgewertet.

Anhand dieser Analysen konnten die Pilotproduktionsprozesse mit den höchsten Potentialen im Bereich der Material- und Energieeffizienz identifiziert werden. Diese sind bei der Materialeffizienz ausschließlich im Bereich der Produktion zu finden. Im Bereich der Energieeffizienz ergeben sich zusätzlich noch Potentiale in anderen produktionsnahen Unternehmensbereichen.

Die Bearbeitung des AP 2 ist abgeschlossen.

Arbeitspaket 3

Die Verbrauchskennwerte im Bereich der Materialeffizienz in den Pilotproduktionsprozessen wurden mit verschiedenen Methoden identifiziert. Zum einen wurden die Abfall-, Ausschuss-, und die Reklamationsdaten der einzelnen Projektpartner analysiert. Zum anderen wurden die Ausschussursachen mit einem Ishikawa-Diagramm analysiert und kategorisiert.

Durch die Analyse eines repräsentativen Portfolioquerschnittes der einzelnen Unternehmen und der Kostenstruktur der Produkte konnten die Verbrauchskennwerte monetär bewertet werden. Die unternehmensübergreifende Auswertung ergab, dass der größte Materialverbrauch bei allen betrachteten KMU im Bereich der Fertigung, hauptsächlich bei urformenden und spanenden Verfahren zu finden ist.

Zudem lässt sich festhalten, dass es signifikante Unterschiede bei vermeidbarem Materialverbrauch zwischen Unternehmen mit hohem und niedrigem Automatisierungsgrad gibt. Unternehmen mit einem hohen Automatisierungsgrad haben einen hohen Verschnitt bedingten Materialverlust. Bei den KMU mit geringer Automatisierung ist der größte Materialverlust im Bereich Ausschuss und Nacharbeit durch Qualitätsprobleme zu finden.

Bei der energetischen Betrachtung der ausgewählten Pilotproduktionsprozesse wurden in den Bereichen mit hohem energetischem Einsparpotential Kennwerte abgeleitet, die kostengünstig und mit geringem Aufwand erfasst werden können. Für diese Kennwerte wurden Detailanalysen im Grund- und Spitzenlastbereich durchgeführt.

Die Bearbeitung des AP 3 ist abgeschlossen.

Arbeitspaket 4

Anhand von Mitarbeiterinterviews und der Analysen der in AP 3 gewonnen Daten, konnte der Mitbeeinfluss in allen Pilotproduktionsprozessen im Bereich der Materialeffizienz quantifiziert werden.

Bei Metall verarbeitenden KMU hat der Mitarbeiter den höchsten Einfluss auf vermeidbare Maschinenausfälle und dem Einstellen der Maschinen. Bei KMU mit urformenden Produktionsprozessen kann eine höhere Materialeffizienz erreicht werden, indem die Mitarbeiter über ihren Materialverbrauch unmittelbar informiert werden. Hier ergeben sich Einflussmöglichkeiten des Mitarbeiters über die gesamte Prozesskette hinweg.

Zusätzlich zu der Analyse der in REVisER teilnehmenden Unternehmen wurden Materialverluste von 10 ehemaligen Projektpartnern auf die Möglichkeit hin untersucht, Optimierungen durch den Einsatz von Visualisierungstechnik und Einbindung der Mitarbeiterverantwortung durchzuführen. Die Analyse der insgesamt 208 Materialverluste ergab, dass diese Optimierungsmöglichkeit besonders gewinnbringend bei Prozessen mit niedrigem Automatisierungsgrad und hoher Flexibilität ist. Ferner wurden die Verlustarten, die durch Visualisierungstechnik und dadurch gesteigerte Mitarbeitermotivation minimiert werden können, in einem allgemeingültigen Ishikawa Diagramm zusammengefasst.

Zur Steigerung der Energieeffizienz wurden vielfältige Einflussmöglichkeiten des Mitarbeiters ermittelt, die einen direkten Einfluss auf die Senkung des Gesamtverbrauchs und der Spitzenlast haben könnten. Ein hoher Mitbeeinfluss wurde bei gelegentlich benutzten Abteilungen, Arbeitsplätzen und Sozialräumen festgestellt. Weiterhin kann durch die Kenntnis und Visualisierung des Energiebedarfs von einzelnen Anlagen und Arbeitsstationen (z.B. Brennöfen oder Reinigungsstationen) eine energetisch optimale Bestückung erfolgen und gleichzeitig teure Lastspitzen vermieden werden. Darüber hinaus trägt eine gezielte Visualisierung der Material- und Energieverbräuche während des Einrichtbetriebes von Werkzeugmaschine zur Effizienzsteigerung bei. Des Weiteren sollen Rückkopplungen von Prozessdaten über Materialeingangs- und Materialausgangsmengen implementiert werden. Diese tragen zur nachhaltigen Materialeffizienz bei.

Die Bearbeitung des AP 4 ist abgeschlossen.

Arbeitspaket 5

Gemeinsam mit dem Forschungsinstitut Betriebliche Bildung wurde eine Motivationssystematik entwickelt. Für diese wird zwischen den Variablen „Prozess“ und „Unternehmen“ sowie deren Ausprägungen unterschieden.

Zur Erfassung der Ausprägungen unterschiedlicher Prozesse und deren Einfluss auf eine Motivationssystematik wurde das in AP 4 erarbeitete Ishikawa Diagramm weiterentwickelt und um Energieverschwendungen erweitert. Die Ausprägung der Variable „Unternehmen“ wurde gemeinsam den verschiedenen Kooperationspartnern erarbeitet. Diese Ausprägungen können aufgrund der Diversität der Kooperationspartner verallgemeinert werden.

Anhand der Ausprägungen der Variablen „Prozess“ und „Unternehmen“ wurden für 16 verschiedene Motivationsmöglichkeiten Ausschlusskriterien definiert, mit denen es möglich ist, die passende Motivationsmöglichkeit zu relevanten Anwendungsfällen zu finden. Diese basieren im Optimalfall auf extrinsischer und intrinsischer Motivation.

Die Bearbeitung des AP 5 ist abgeschlossen.

Ergänzend zu diesem Arbeitspaket wurde zusätzlich eine PC-Anwendung entwickelt, mit der produzierende KMU für relevante Anwendungsfelder Empfehlungen für eine Mitarbeitermotivation erhalten.

Arbeitspaket 6

In Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern wurden für die einzelnen Pilotproduktionsprozesse die notwendigen Messgrößen identifiziert und die passende Messtechnik ausgewählt. Bei der Auswahl lag der Fokus darauf, einen möglichst simplen und robusten Aufbau zu gewähren. Der Vorgabe Mess- und Visualisierungstechnik mit geringem Kostenaufwand zu verwenden konnte in allen Fällen Rechnung getragen werden.

Mit der Verknüpfung von Stromwandlern und Leistungsmesssonden mit einer Recheneinheit können alle relevanten Energieeffizienzpotentiale der Kooperationspartner erfasst und ausgewertet werden. Für die messtechnische Erfassung der Materialeffizienzpotentiale lässt sich aufgrund der Diversität der Produkte der Kooperationspartner kein allgemeingültiger Aufbau definieren.

Die Auswahl der Visualisierungstechnik hängt erheblich von den drei Faktoren Leseentfernung, Darstellungsmöglichkeit und der erforderlichen Schutzart des Gehäuses ab.

Die Bearbeitung des AP 6 ist abgeschlossen.

Arbeitspaket 7

Bei der Implementierung der notwendigen Technik in den Pilotprozessen der Kooperationspartner wurde stets darauf geachtet, den Produktionsbetrieb nicht zu beeinträchtigen. Dies konnte durch die Vormontage von unterschiedlichen Baugruppen und ausgiebigen Test im Vorfeld der Implementierungen erreicht werden. Zudem wurde bei der Softwareentwicklung darauf geachtet, dass durch die Mischung aus manueller und automatischer Referenzwertbestimmung, eine schnelle Integration in bestehende Systeme möglich ist.

Die Bearbeitung des AP 7 ist abgeschlossen.

Arbeitspaket 8

Die in AP 7 gesammelten Verbrauchskennwerte wurden mit den Daten aus AP 2 verglichen und die Ersparnis dokumentiert. Im Bereich der Energieeffizienz konnten Ersparnisse von bis zu 76 % erreicht werden. Dieser hohe Wert begründet sich damit, dass die Mitarbeiter in diesem Anwendungsfall unmittelbar an den Ersparnissen partizipieren konnten und so eigenständig die Optimierung weiter voran getrieben haben. Im Bereich der Materialeffizienz konnten Ersparnisse von bis zu 30 % erreicht werden, in dem ein hoher Grad an Transparenz in der Produktauslegung initiiert wurde.

Die Bearbeitung des AP 8 ist abgeschlossen.

Arbeitspaket 9

Für das Aufstellen des Modells zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde zunächst der geleistete Aufwand für Arbeitszeit und Ausrüstung, der für die Detailplanung und die Implementierung der Intervention aufgebracht wurde, ermittelt und rechnerisch um einen angenommenen Lerneffekte des Projektteams bereinigt. Diesem Aufwand wurden die in AP 8 ausgewiesenen Einsparungen gegenübergestellt. Anschließend wurde eine Amortisationszeit ausgewiesen. Die Berechnung dieser Amortisationszeit ergibt sich zu: $\text{Amortisationszeit} = (\text{Ersparnis} - \text{Betriebskosten}) / \text{Kapitaleinsatz}$.

Ergebnis dieses Arbeitspakets ist ein einfach zu handhabendes Berechnungsmodell, in dem der monetäre Aufwand für die Implementierung unterschiedlicher Mess- und Visualisierungstechniken hinterlegt ist.

Die Bearbeitung des AP 9 ist abgeschlossen.

Arbeitspaket 10

Im Rahmen des Forschungsprojektes REVisER konnte ein Maßnahmengerrüst entwickelt werden, das Ressourcen spart, produkt- und branchenunabhängig einsetzbar ist und niedriger Investitionskosten in Mess- und Visualisierungstechnik bedarf. Zudem ermöglicht das Maßnahmengerrüst eine Steigerung der Prozesskenntnisse der beteiligten Mitarbeiter sowie einen Wissenstransfer von erfahrenen zu unerfahrenen Mitarbeitern. Dieses Maßnahmengerrüst ist im Detail dem Leitfaden „Ressourceneffizienz im Unternehmen: Visualisierungstechnik nutzen – Mitarbeiter motivieren“ zu entnehmen. Dieser erscheint in der Reihe „Leitfaden für die Bildungspraxis“ des wbv-Verlags.

Die Bearbeitung des AP 10 ist abgeschlossen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Auf dem offiziellen Projekt-Kick-off am 15.03.2013, bei dem alle Projektpartner mit insgesamt 16 Teilnehmern vertreten waren, wurde über den weiteren Verlauf diskutiert. Zudem wurde eine Pressemitteilung an die zuständigen Stellen der Universität Bayreuth herausgegeben.

Unter: http://www.lup.uni-Bayreuth.de/de/universitaere_forschung/02_Forschungsprojekte/81_reviser/ können Interessierte den Projekthintergrund, die Projektziele sowie das allgemeine Vorgehen detailliert nachlesen. Zudem finden sich dort die Ansprechpartner des Lehrstuhles sowie der Förderträger und die teilnehmenden Unternehmen.

Bei der Teilnahme an der Konferenz des Netzwerks Ressourceneffizienz des VDI am 17.06.2013 in Berlin konnten die Ansätze des REVisER-Projektteams erstmals mit Fachpublikum diskutiert werden.

Es wurde am 02.09.2013 im Rahmen des Projektes ein Artikel im lehrstuhleigenen Newsletter veröffentlicht. Dieser erscheint vierteljährlich und erreicht ca. 1800 Empfänger.

Der Artikel „Mitarbeitermotivierte Prozessoptimierung – Eine Chance für produzierende Unternehmen“ konnte in der Zeitschrift Oberfränkische Wirtschaft platziert werden. Dieser Artikel erschien in der Ausgabe 11/12 und beschreibt die Ansätze des Forschungsprojektes REVisER und deren Anwendungsmöglichkeiten. Herausgeber dieser Zeitschrift, die hauptsächlich kleine und mittelständische Unternehmen erreicht, ist die IHK für Oberfranken Bayreuth.

Auf der Netzwerkkonferenz Ressourceneffizienz des VDI am 01.12.2013 in Berlin konnte das Projektteam von REVisER erstmals in einem 5-min-Vortrag die Ansätze und den innovativen Charakter des Forschungsprojektes dem Fachpublikum vorstellen. In der nachfolgenden Diskussion konnten die positiven Resonanzen in neue Kontakte umgesetzt werden.

In der ersten Ausgabe in 2014 der ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb konnte ein vielgelesener Artikel platziert werden. In dem Artikel, **Motivierte Prozessoptimierung - Eine Methode moderner Kommunikations- und Visualisierungstechnik zur Realisierung effizienter Prozesse**, wird die in REVisER erarbeitete Maßnahmengestaltung mit Gestaltungsrichtlinien und Anwendungsbeispielen erläutert. Weiterhin wurde diese Systematik mit Informationsständen auf der 13. Netzwerkkonferenz am 23. Juni in Berlin und der 5. Pius Länderkonferenz am 01. und 02. Juli präsentiert. Zudem wurde auf der 5. PIUS Länderkonferenz ein 10-minütiger Impulsvortrag vor Fachpublikum gehalten.

Die erarbeitete Motivationssystematik wurde in einer PC-Anwendung umgesetzt und wird nach Abschluss des Projektes gemeinsam mit dem Leitfaden vertrieben. Die PC-Anwendung gibt dem Benutzer praktische Hinweise zur Einführung von ressourceneffizienzsteigernden Motivationsmethoden.

Der letzte Schritt im Rahmen des Projektes war Druck des Leitfadens „Ressourceneffizienz im Unternehmen: Einsparpotenziale sichtbar machen – Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen motivieren“. Dieser erscheint in der Reihe „Leitfaden für die Bildungspraxis“ des wbv-Verlags.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Zusammenfassung	1
2 Einleitung.....	3
3 Hauptteil.....	8
3.1 Arbeitspakete und angewandte Methoden	8
3.1.1 Bestimmung des Status-Quo	8
3.1.2 Detailplanung ressourcensparender Interventionen.....	19
3.1.3 Anwendung und Validierung	31
3.1.4 Weiterverarbeitung des erworbenen Wissens	44
3.2 Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse.....	49
3.2.1 Verbreitung durch Vorträge.....	49
3.2.2 Verbreitung durch Printmedien	50
3.2.3 Verbreitung durch Lehre	51
3.2.4 Weckung von Industrieinteresse	52
4 Fazit und Ausblick	53
5 Literaturverzeichnis	55
6 Anhang.....	58

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wege zur Verringerung der THG-Emissionen in der EU [EuK11].....	3
Abbildung 2: Einordnung in bestehende Ansätze der Ressourceneffizienz [Sla12]	4
Abbildung 3: Detaillierter Projektplan im Projekt REVisER.....	7
Abbildung 4: Ergebnis inneren Einstellung der Mitarbeiter bei Lauterbach-Kießling .	10
Abbildung 5: Elektrischer Lastgang Sebald	15
Abbildung 6: Stanz-Biegeautomat	17
Abbildung 7: Vorgehen zur Potenzialbestimmung.....	20
Abbildung 8: Gliederung des Leitfadens.....	20
Abbildung 9: Mitarbeiter beim Profilieren (links) und beim Planieren (rechts)	22
Abbildung 10: Betontrichter Lauterbach-Kießling	23
Abbildung 11: Leistungsaufnahme eines Stanz-Biegeautomaten	25
Abbildung 12: Flexible Merkmale der Visualisierungstechnik	27
Abbildung 13: Geeignete Messtechnik und Schnittstellen.....	30
Abbildung 14: Veränderungsmanagement (in Anlehnung an [Ran08])	32
Abbildung 15: Installation der Implementierungen.....	33
Abbildung 16: Visualisierung Energiebedarf - Sebald	34
Abbildung 17: Visualisierung Materialeinsatz - Sebald.....	35
Abbildung 18: Visualisierung in der Produktionshalle - Sebald	35
Abbildung 19: Visualisierung Energiebedarf - Lauterbach-Kießling.....	36
Abbildung 20: Visualisierung Materialeinsatz - Lauterbach-Kießling	37
Abbildung 21: Visualisierung Druckluftverbrauch - Klubert + Schmidt.....	37
Abbildung 22: Visualisierung Rüstvorgänge - Federnfabrik Dietz.....	38
Abbildung 23: Auswertung Energiebedarf - Sebald	39
Abbildung 24: Auswertung Materialeinsatz I - Sebald	39
Abbildung 25: Auswertung Materialeinsatz II - Sebald	40
Abbildung 26: Auswertung Druckluftverbrauch - Klubert + Schmidt	41
Abbildung 27: Auswertung Materialeinsatz - Federnfabrik Dietz	42
Abbildung 28: Prozessexperten an der Visualisierung	42
Abbildung 29: Gemeinsamer Workshop bei einem Kooperationspartner	44
Abbildung 30: Hauptursachen der Materialverschwendungen	48
Abbildung 31: Impressionen des REVisER-Vortrags auf der 12. NERESS	50
Abbildung 32: Leistungsmotivation Federnfabrik Dietz.....	58
Abbildung 33: Leistungsmotivation Klubert + Schmidt.....	58
Abbildung 34: Leistungsmotivation Lauterbach-Kießling	59
Abbildung 35: Leistungsmotivation Sebald Schleifscheiben.....	59

Abbildung 36: Beleuchtung Lauterbach-Kießling Vorher/Nachher	60
Abbildung 37: 1. Eingabe der Unternehmenseigenschaften	61
Abbildung 38: 2. Eingabe der zu betrachtenden Ressource	62
Abbildung 39: 3. Ausschussbereich und der Ausschussursache - Energie	63
Abbildung 40: 3. Ausschussbereich und der Ausschussursache - Material	64
Abbildung 41: 4. Auswahl der Motivationsmethode	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wahl des Pilotproduktionsprozesses Material - Sebald	11
Tabelle 2: Wahl des Pilotproduktionsprozesses Material - Lauterbach-Kießling	12
Tabelle 3: Wahl des Pilotproduktionsprozesse Material - Klubert + Schmidt.....	12
Tabelle 4: Wahl des Pilotproduktionsprozesses Material - Federnfabrik Dietz	13
Tabelle 5: Wahl des Pilotproduktionsprozesses Energie - Sebald.....	14
Tabelle 6: Wahl des Pilotproduktionsprozesses Energie - Lauterbach-Kießling.....	15
Tabelle 7: Wahl des Pilotproduktionsprozesses Energie - Klubert + Schmidt	16
Tabelle 8: Wahl des Pilotproduktionsprozesses Energie - Federnfabrik Dietz	17
Tabelle 9: Ergebnis des AP 3	18
Tabelle 10: Einflussnahme durch Mitarbeiter beim Materialeinsatz - Sebald.....	21
Tabelle 11: Einflussnahme durch Mitarbeiter beim Materialeinsatz - Lauterbach-Kießling	22
Tabelle 12: Einflussnahme durch Mitarbeiter beim Materialeinsatz - Klubert + Schmidt ...	24
Tabelle 13: Einflussnahme durch Mitarbeiter beim Materialeinsatz - Federnfabrik Dietz ..	25
Tabelle 14: Bestimmende Merkmale der Visualisierungstechnik.....	27
Tabelle 15: Wahl der Visualisierungstechnik und Darstellungsmöglichkeiten	28
Tabelle 16: Identifizierte Messgrößen und Messtechnik.....	29
Tabelle 17: Detailauswertung - Lauterbach-Kießling	41
Tabelle 18: Evaluierung der Visualisierung und der Anreize	43
Tabelle 19: Amortisationen der Interventionen	45
Tabelle 20: Berechnungsmodell Visualisierungstechnik.....	46
Tabelle 21: Eingesparten Menge an Material und Energie (pro Jahr)	48
Tabelle 22: Berechnung der CO ₂ -Einsparungen	49
Tabelle 23: IP-Code.....	66
Tabelle 24: Unterscheidung für 1. Kennziffer.....	66
Tabelle 25: Unterscheidung für 2. Kennziffer.....	67

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AP	Arbeitspaket
Bspw.	Beispielsweise
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
d	Tage
DIN	Deutsche Industrienorm
EG	Erdgeschoss
IHK	Industrie- und Handelskammer
Kg	Kilogramm
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
LED	Licht emittierende Diode
NERESS	Netzwerkkonferenz Ressourceneffizienz
P _{ges}	Gesamtleistung
REVisER	Resource Efficiency through Visualisation and Employee's Responsibility
T	Zeit
t/a	Tonnen pro Jahr
TFT	Thin-Film Transistor
THG	Treibhausgas
u.a.	unter anderem
USB	Universal Serial Bus

1 Zusammenfassung

Ziel des Projekts war es, die Auswirkungen von komparativem Echtzeit-Feedback¹ auf den verantwortungsbewussten Umgang der Mitarbeiter² mit den Ressourcen Energie und Material am Produktionsarbeitsplatz in Pilotprojekten zu untersuchen. Hierbei sollten die wirtschaftlichen Vorteile der Mitarbeitersensibilisierung gezielt herausgearbeitet werden, um Unternehmen zukünftig Anreize für die Umsetzung der Forschungsergebnisse für eine ressourcenschonende Produktion zu bieten. Die Analyse und die Erarbeitung von Optimierungsansätzen erfolgten im Rahmen von Pilotumsetzungen bei beteiligten Kooperationspartnern.

Im Vordergrund der Untersuchungen standen die Reduktion der Energie- und Materialverluste in der Produktion mit niedrigem Investitionsaufwand. Durch die Erfassung und Steigerung der Ressourceneffizienz in der Produktion der Kooperationspartner wurde auch der Forderung nach kontinuierlicher Verbesserung Rechnung getragen.

Zu den Pilotimplementierungen wurde eine Systematik entwickelt, die neben einer aktiven Mitarbeitereinbindung in der Produktion nicht nur die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen stärkt, sondern auch die Mitarbeitermotivation steigert, Ressourcen zu sparen, und die Umwelt signifikant entlastet. Diese Systematik wurde in einem Leitfaden samt Softwareanwendung veröffentlicht. Zudem wurden die in REVisER entwickelte Systematik in den Vorlesungen und der Lernfabrik des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik übernommen. In den Pilotimplementierungen wurden folgende Einsparungen realisiert:

- Lauterbach-Kießling GmbH (Hersteller von Betonbauteilen): Reduzierung des Stromverbrauchs der Beleuchtung um 75%, Reduzierung der Restmenge Beton im Trichter um 1%
- Kooperationspartner Federnfabrik Dietz GmbH (Hersteller von Federn und Stanz-Biegeteilen): Reduzierung des Materialverbrauchs im Rüstbetrieb um 30%
- Klubert + Schmidt GmbH (Hersteller von Abgasklappen): Senkung des Druckluftverbrauchs um 16%
- Sebald & Co. GmbH (Hersteller von Schleifscheiben): Glättung der Lastspitzen um 19%, Reduzierung des Ausgangsgewichts der Schleifscheiben um 5%

Im Rahmen weiterer Forschungsarbeit kann ein Einsatz der entwickelten Systematik zum ressourceneffizienten Variantenmanagement, zur Optimierung der Durchlaufzeit sowie im

¹ In folgendem Bericht wird unter dem Begriff Echtzeit ein Zeitverzug von weniger als zwei Sekunden toleriert.

² Alle Angaben dieses Berichtes beziehen sich grundsätzlich sowohl auf die weibliche als auch auf die männliche Form. Zur besseren Lesbarkeit wurde meist auf die zusätzliche Bezeichnung in weiblicher Form verzichtet.

Bereich des Qualitätsmanagements evaluiert werden. Besonders vielversprechend kann der Einsatz der Systematik in der Fertigungsorganisation sein, da hier die Ursachen der meisten Ressourcenverschwendungen liegen. Weiterhin besteht Forschungsbedarf in der automatisierten Erfassung von Materialverbräuchen.

2 Einleitung

Die Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen (THG) ist seit vielen Jahren Zielgröße nationaler und internationaler Politik. So sieht bspw. der Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft der europäischen Kommission eine Verringerung der THG-Emissionen bis 2050 um 80 % im Vergleich zum Jahr 1990 vor (Abbildung 1). Für den industriellen Sektor bedeutet dies zunächst bis zum Jahr 2030 eine Verringerung des THG-Ausstoßes um 34 % - 40 % im Vergleich zum Jahr 1990 [EuK11].

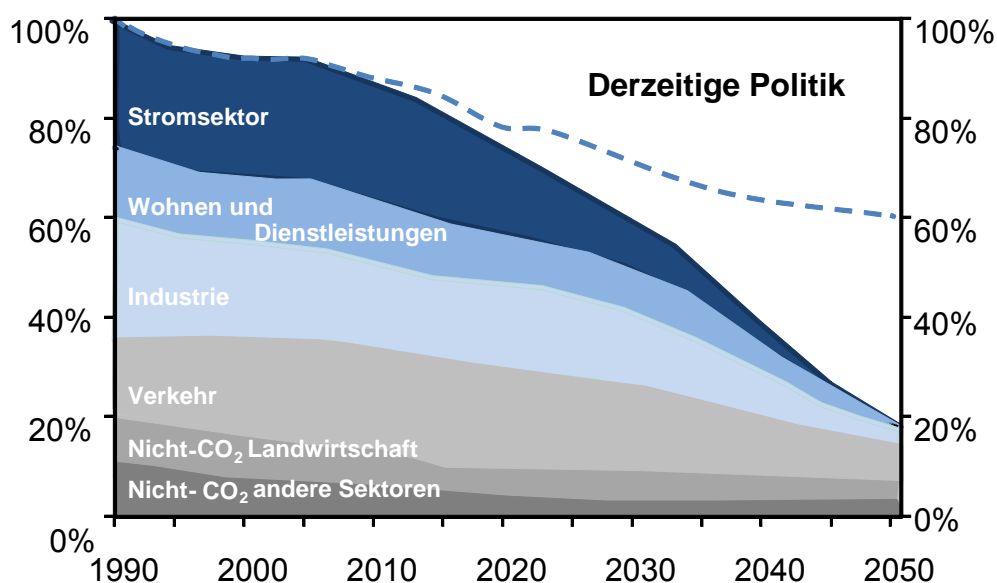


Abbildung 1: Wege zur Verringerung der THG-Emissionen in der EU [EuK11]

Ein Teil dieser Industrie stellen produzierende Unternehmen dar. In diesen tragen der ineffiziente Umgang mit Materialien und Energie und die daraus resultierenden Verschwendungen erheblich zum THG-Ausstoß und zur Umweltbelastung bei. Das Forschungsprojektes REVisER setzt mit der Senkung der Material- und Energieressourcen an dieser Stelle an und liefert deshalb einen Beitrag zur Reduktion des THG-Ausstoßes und zur Entlastung der Umwelt. Für ein rohstoffarmes Land wie Deutschland hat ein effizienter Umgang mit Material- und Energieressourcen auch einen bedeutenden volkswirtschaftlichen Nutzen.

Studien belegen die erheblichen Potenziale zur Steigerung der Material- und Ressourceneffizienz. So quantifiziert die Studie „Energieeffizienz in der Produktion“ der Fraunhofer-Gesellschaft das mittelfristig umsetzbare Energieeinsparpotenzial in der Produktion auf mindestens 25 % und betont in diesem Zusammenhang den Bedarf an Methoden zur Bewertung und Optimierung der Energieeffizienz im Maschinen- und Anlagenbau [FhG08]. Für die Steigerung der Materialeffizienz in deutschen produzierenden

Unternehmen stellt eine Studie zur Rohstoff- und Materialeffizienz der KfW Bankengruppe ein Potenzial in Höhe von fast zehn Prozent in Aussicht und betont gleichzeitig den großen Anteil von 46 %, den die Materialkosten in der Kostenstruktur deutscher verarbeitender Unternehmen einnehmen [KfW09].

Um diese Potenziale zu heben, existieren vielfältige Ansätze (Abbildung 2). Diese Ansätze der Ressourceneffizienzsteigerung zielen auf die Modernisierung des Anlagenparks oder auf eine Anpassung der Produktgestaltung ab (vgl. [Spa09] [DIN11] [Sla12]). Sie bringen aufgrund der großen Investitionssummen in den meisten Fällen lange Amortisationszeiten mit sich [FhG08]. Studien aus dem Bereich der Materialeffizienz zeigen, dass sich daraus finanzielle Hemmnisse für die Umsetzungen von effizienzsteigernden Maßnahmen ergeben. Als größte nicht-finanzielle Hemmnisse lassen sich fehlende personelle Ressourcen sowie der Zeitmangel identifizieren [KfW09]. Erfolgsversprechend erscheint somit ein Ansatz, der niedriger Investitionen und geringer personeller Kapazitäten bedarf. Diese Anforderungen erfüllt der Ansatz der Ressourceneffizienzsteigerung durch die Reduzierung verhaltensbedingter Verschwendungen.

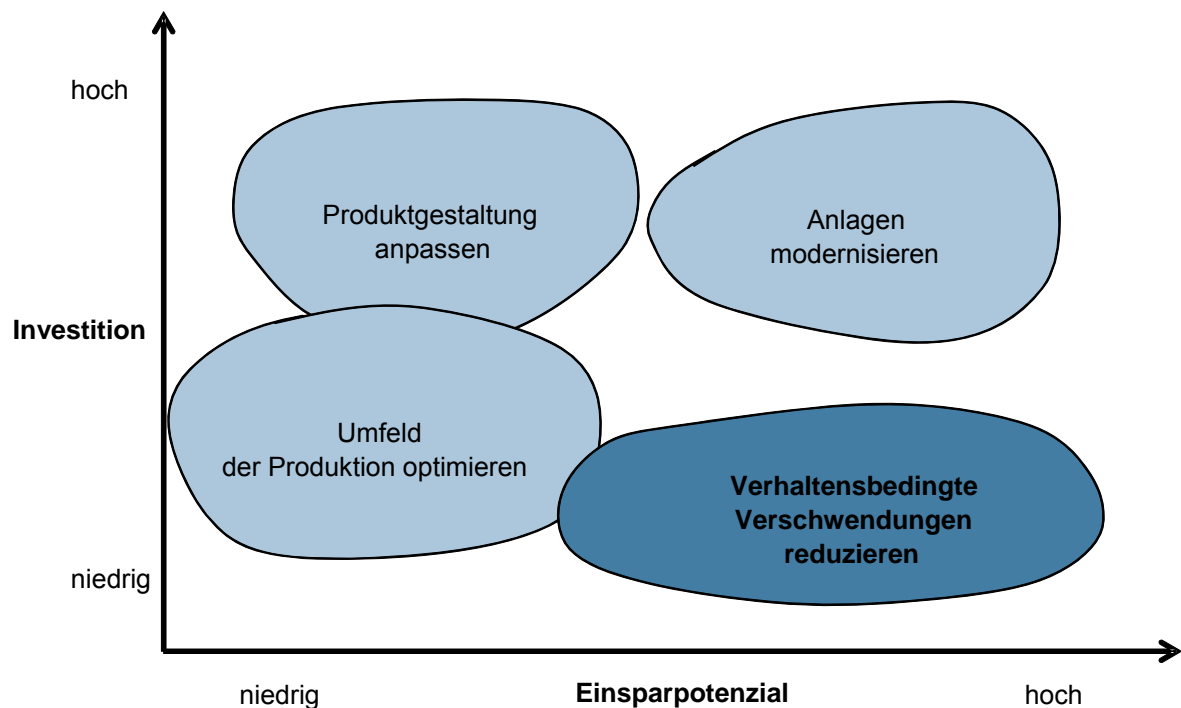


Abbildung 2: Einordnung in bestehende Ansätze der Ressourceneffizienz [Sla12]

Verhaltensbedingte Verschwendungen resultieren zumeist aus dem nicht ressourceneffizienten Verhalten von Mitarbeitern im Produktionsprozess. Um Mitarbeiter zu motivieren, verhaltensbedingte Verschwendungen zu reduzieren, ergeben sich nach dem Stand der Wissenschaft drei wesentliche Ansätze:

- Schaffung von Transparenz bezüglich des Grades der Prozesserrfüllung,
- dauerhafte Sensibilisierung durch Motivation und
- Einsatz von Visualisierungstechnik zum Echtzeit-Feedback [Ste14].

Transparenz bedeutet, dass der Mitarbeiter eine objektive Bewertung des eigenen Handelns vollziehen und dessen Auswirkungen in angemessener Weise bewerten kann. Zur Schaffung dieser Transparenz ist eine zielgenaue Datengrundlage Voraussetzung. Gegenwärtig werden zur Bestimmung der Verschwendungen im Bereich Materialeffizienz häufig Medianwerte oder Schätzungen herangezogen. Die so vorliegende Datenqualität erschwert die Bewertung von Optimierungspotenzialen. Verschiedene Studien sehen deshalb Handlungsbedarf in der Datenerfassung sowie in der Datenverarbeitung in Echtzeit [FHG08] [Eme13]. Ein Ansatz ist es, Produkt- und Prozessdaten durch den Ausbau und die Integration moderner Informations- und Kommunikationstechnologien zu erhalten [Wue13]. Gerade die Transparenz des eigenen Handelns stellten schon die Gründer der modernen Verhaltensforschung in den Mittelpunkt ihrer Wissenschaft und betonten deren positive Effekte auf das Leistungsvermögen Einzelner [Atk57] [Hac76]. Aber auch im Forschungsbereich der Ressourceneffizienz wird die fehlende Transparenz bezüglich des Grades der Prozesserrfüllung als einer der Hauptgründe für verhaltensbedingte Verschwendungen genannt [Sch04] [Sch12].

Neben der Transparenz ist die dauerhafte Sensibilisierung für die wirtschaftlichen Konsequenzen des Handelns oder der Entscheidungen eines Mitarbeiters ein weiterer wichtiger Ansatz, verhaltensbedingte Verschwendungen zu reduzieren [Sch12] [Sla12]. Diese erfolgt, wenn mit der zu optimierenden Handlung gleichzeitig weitere, vom Mitarbeiter als bedeutsam erachtete Motive erfüllt werden. Die Sensibilisierung kann durch Motivation mittels extrinsischer und intrinsischer Anreize erfolgen [Hac76]. Motivation ist die aktivierte Verhaltensbereitschaft eines Individuums im Hinblick auf die Erreichung bestimmter Ziele und ist somit ein besonders hilfreiches Instrument zur dauerhaften Sensibilisierung [Bec10]. Eine solche motivationsbasierte Sensibilisierung kann die Initialisierung einer kontinuierlichen Optimierung verhaltensbedingter Verschwendungen und somit eine zunehmende Ersparnis bewirken.

Der dritte wesentliche Ansatz ist der Einsatz von Visualisierungstechnik zur Rückmeldung in Echtzeit von entstandenen Verschwendungen oder dem Aufzeigen von erreichten Verbesserungen im Vergleich zu Referenzwerten [Sla12] [Mae10] [Fre09]. Dadurch sollen

verhaltensbedingte Verschwendungen unmittelbar sichtbar gemacht werden. Eine Kombination dieser drei Ansätze wurde im Forschungsprojekt REVisER realisiert.

Realisiert wurde dabei eine vollständige und auf verschiedene Industriezweige adaptierbare Systematik zur Einbeziehung der Mitarbeiter durch die Auswahl von Visualisierungstechniken und Motivierungsprinzipien. Zur Ergebnisverbreitung erstellten die Wissenschaftler des Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik und des Forschungsinstitut Betriebliche Bildung ein Leitfaden mit einer Software-Anwendung. Screenshots dieser Softwareanwendung sind dem Anhang in den Abbildungen 36 bis 40 zu entnehmen. Die Wirksamkeit dieser Systematik konnte mit den Pilotprojekten bei den Kooperationspartnern belegt werden. Zusätzlich erfolgte der Aufbau eines Demonstrators in der bestehenden Lernfabrik sowie an den Werkzeug- und Messmaschinen des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik an der Universität Bayreuth. Die Erkenntnisse wurden entsprechend den Zielvorgaben verarbeitet und veröffentlicht. Sie werden zukünftig auch in produktionsnahen Studiengänge Eingang finden, mit denen künftige Fachkräfte für Ressourceneffizienz und Umweltschutz qualifiziert werden.

Im Projekt REVisER wurden die nach Abbildung 3 dargestellten Arbeitspakete (AP) bearbeitet. Die ersten vier AP beschäftigten sich zunächst mit der Aufnahme des Status-Quo an Pilotprozessen bei den Kooperationspartnern. Anschließend erfolgte die Detailplanung der ressourceneinsparenden Intervention (AP 4 bis AP 6) und die Anwendung und Validierung (AP 7 bis AP 8). Abschließend wurde die Weiterverarbeitung des erworbenen Wissens sichergestellt (AP 9 bis AP 10).

An dem Projekt waren folgende Akteure beteiligt:

- Forschungspartner Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik (LUP),
- Forschungspartner Forschungsinstitut Betriebliche Bildung (f-bb),
- Kooperationspartner Sebold & Co. GmbH (Hersteller von Schleifscheiben),
- Kooperationspartner Lauterbach-Kießling GmbH (Hersteller von Betonbauteilen),
- Kooperationspartner Klubert + Schmidt GmbH (Hersteller von Abgasklappen) und
- Kooperationspartner Federnfabrik Dietz GmbH (Hersteller von Federn und Stanz-Biegeteilen).

AP	Projektmonat:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
1	Ermitteln von Kenntnissen und der inneren Einstellung der Mitarbeiter zum Ressourcenverbrauch im Status-Quo an den Pilotproduktionsprozessen																			Bestimmen des Status-Quo	
2	Auswählen von Pilotproduktionsprozessen nach Einsparpotential bei den Kooperationspartnern (Nutzung der im Forschungsprojekt "Method for Efficiency" entwickelten Systematik)																				
3	Festlegen und Erfassen von Verbrauchskennwerten im Status-Quo (Produktionsprozesse und Infrastruktur) an den Pilotproduktionsprozessen																				
4	Bestimmen der Einflussmöglichkeiten für Mitarbeiter zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs an den Pilotproduktionsprozessen																			Detailplanung ressourcensparender Intervention	
5	Entwickeln der Visualisierungs- und Motivationsystematik																				
6	Identifizieren der zur Visualisierung notwendigen Messgrößen und spezifizieren der erforderlichen Messtechnik																				
7	Implementieren der Testausrüstung der Mess- und Visualisierungstechnik sowie der Motivationsystematik in den Pilotproduktionsprozess																			Anwendung und Validierung	
8	Dokumentieren der Einsparungen sowie Evaluieren der Wirkung unterschiedlicher Arten an Visualisierungen und Anreizen auf die Mitarbeitermotivation																				
9	Aufstellen eines Modells für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen über die Anschaffung von Visualisierungstechnik																			Weiterverbreitung des erworbenen Wissens	
10	Zusammenfassen der Ergebnisse der Felderprobung zu einem Maßnahmengerrüst bestehend aus Leitfaden und PC-Anwendungen. Aufbauen von erlebbaren Demonstratoren als Erweiterung der bestehenden Demontage- und Produktionsfabrik an der Universität Bayreuth																				

Abbildung 3: Detaillierter Projektplan im Projekt REVisER

3 Hauptteil

Im folgenden Kapitel sind die Inhalte und Ergebnisse der AP detailliert dokumentiert. Dabei wird auf die angewandten Methoden und Instrumente eingegangen. Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung (Abschnitt 3.1). Anschließend werden die Ergebnisse in Hinblick auf die ökologische und ökonomische Dimension bewertet (Abschnitt 3.2). Zuletzt werden die Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse dargelegt (Abschnitt 3.3).

3.1 Arbeitspakete und angewandte Methoden

Abschnitt 3.1 gliedert sich in Anlehnung an den Projektplan (Abbildung 3) zu:

- AP 1 bis AP 3: Bestimmung des Status-Quo (Unterabschnitt 3.1.1),
- AP 4 bis AP 6: Detailplanung ressourcensparender Interventionen (Unterabschnitt 3.1.2),
- AP 7 bis AP 8: Anwendung und Validierung der Methoden (Unterabschnitt 3.1.3) und
- AP 9 bis AP 10: Weiterverarbeitung des erworbenen Wissens (Unterabschnitt 3.1.4).

3.1.1 Bestimmung des Status-Quo

AP 1: Ermitteln der inneren Einstellung der Mitarbeiter

Zunächst wurden in AP 1 die Kenntnisse und die innere Einstellung der Mitarbeiter zum Ressourcenverbrauch im Status-Quo ermittelt. Die Wissenschaftler des Forschungsinstituts Betriebliche Bildung (f-bb) GmbH führten dazu einen Leistungsmotivationstest nach Schuler [Sch00] mit den Mitarbeitern der Kooperationspartner durch. Im Rahmen des REVisER Projektes wurde zunächst der Ausprägungsgrad berufsbezogener Dimensionen der Leistungsmotivation von den Mitarbeitern der Pilotprozesse analysiert, da die Leistungsmotivation einen entscheidenden Einfluss auf die Erfüllung beruflicher Anforderungen hat. Insbesondere wenn Veränderungsprozesse anstehen, ist es sinnvoll, die Einstellung und Motivation der Mitarbeiter vorab abzubilden, um die erzielten Erkenntnisse in die Ausgestaltung der Optimierungsmaßnahmen einfließen lassen zu können. Dazu wurde der von Heinz Schuler und Michael Prochaska entwickelte Fragebogen des Leistungsmotivationsinventars eingesetzt [Sch01]. Der standardisierte Fragebogen berücksichtigt berufsrelevante Dimensionen, die in verschiedenen Leistungsmotivationstheorien thematisiert werden und ergänzt darüber hinaus weitere berufsrelevante Dimensionen, die bisher nicht der Leistungsmotivation zugerechnet worden sind. Das neuartige Testverfahren stützt sich insgesamt auf theoretische Überlegungen und

Ergebnisse aus Literaturanalysen und integriert darüber hinaus empirische Erkenntnisse und eigene Forschungsarbeiten von Schuler und Prochaska. Von den 17 unterschiedlichen Dimensionen berufsbezogener Leistungsorientierung wurden im Rahmen des REVisER-Projektes 7 Dimensionen der Leistungsorientierung genauer betrachtet, die im Kontext der Einführung von betrieblichen Maßnahmen zur Optimierung des Ressourcenverbrauchs als besonders aussagekräftig erachtet wurden. Die Mitarbeiter des zu untersuchenden Pilotbereichs aus den vier Unternehmen, die das Projekt unterstützten, wurden mit Hilfe eines standardisierten Fragebogens befragt, um so Aufschluss über ihre Einstellungen und den Ausprägungsgrad von Engagement, Erfolgszuversicht, Flexibilität, Leistungsstolz und Lernbereitschaft sowie Selbständigkeit und Wettbewerbsorientierung zu erhalten. Diese ausgewählten Dimensionen werden im Folgenden erläutert:

Je stärker das Engagement der Mitarbeiter ausgeprägt ist, desto größer ist ihr Einsatz bei der Arbeit. Erfolgszuversichtliche Personen rechnen damit, auch bei neuen und schwierigen Aufgaben ihr Ziel zu erreichen. Je höher die Flexibilität bei einer Person ausgeprägt ist, desto veränderungsbereiter ist sie, denn sie ist aufgeschlossen gegenüber der Auseinandersetzung mit neuartigen Situationen. Personen mit großem Leistungsstolz zeichnen sich dadurch aus, dass sie in ihrem Selbstwertgefühl stark von ihrer Leistung abhängig sind. Sie möchten ihre eigene Leistung stets steigern. Hinsichtlich der Lernbereitschaft sind Personen mit einer starken Ausprägung wissbegierig und haben Freude daran, etwas Neues zu lernen. Selbständige Personen wollen ihre Arbeitsweise gerne eigenständig bestimmen und treffen gerne unabhängig Entscheidungen. Als letzte Dimension der Leistungsorientierung, die im REVisER Projekt näher betrachtet wurde, lässt sich die Wettbewerbsorientierung nennen. Wettbewerbsorientierte Personen sehen Konkurrenz als Ansporn und Motivation für berufliche Leistung an [Bre12]. Die Befragungsergebnisse wurden anschließend für jedes Unternehmen ausgewertet und analysiert und aus den einzelnen Befragungsergebnissen wurde ein aggregierter Unternehmensdurchschnittswert gebildet, um einen Gesamtüberblick über die Einstellungen und Eigenschaften des Teams der Abteilung zu erhalten. Dadurch konnte für jedes Unternehmen ermittelt werden, wo Motivationsanreize gezielt gesetzt werden müssen, damit die Mitarbeiter sich engagiert für die geplanten Maßnahmen zur Steigerung von Ressourceneffizienz einsetzen. Wenn die Lernbereitschaft der Mitarbeiter eher niedrig ausgeprägt ist, wie bei Lauterbach-Kießling (Siehe Abbildung 4), muss besonders darauf geachtet werden, dass der Schwierigkeitsgrad der geplanten Veränderungen nicht zu hoch liegt, da sich ansonsten die Überforderung negativ auf die Bereitschaft der Mitarbeiter auswirken kann, sich für eine ressourcenschonende Arbeitsweise einzusetzen.

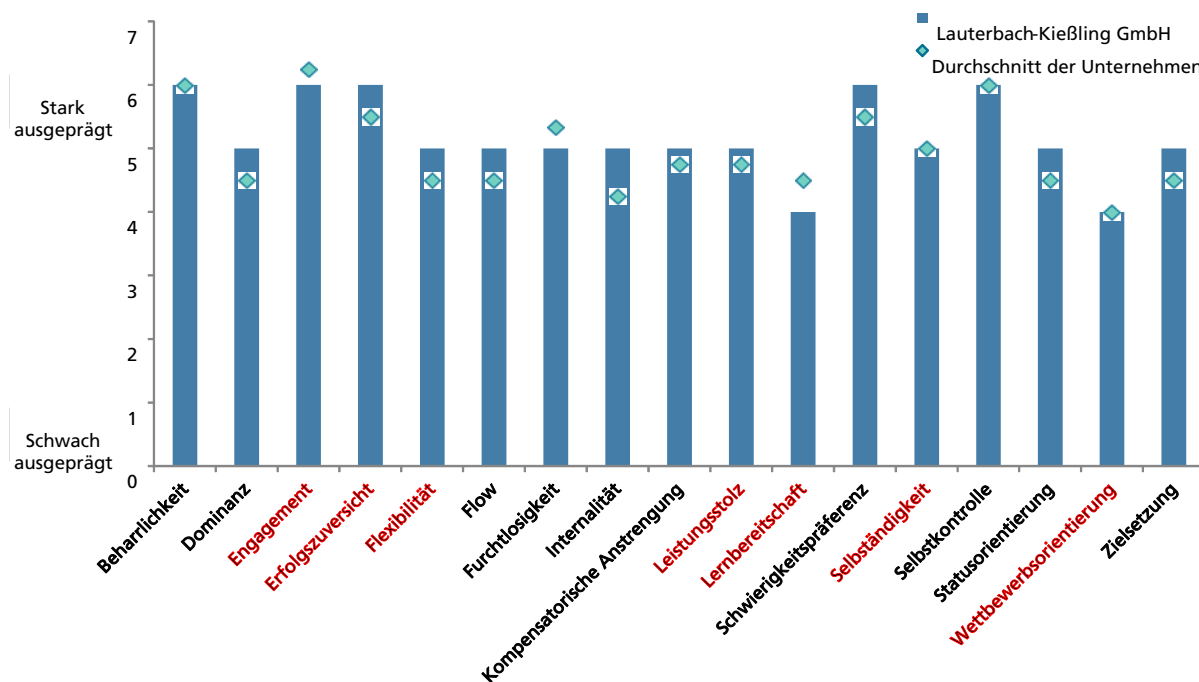


Abbildung 4: Ergebnis inneren Einstellung der Mitarbeiter bei Lauterbach-Kießling

Zusätzliche Motivationsanreize immaterieller Art, wie Gutscheine für Freizeitaktivitäten, werden sich hier positiv auf die Einsatzbereitschaft auswirken. In Unternehmen, in denen die Wettbewerbsorientierung bei den Mitarbeitern eher stark ausgeprägt ist, wird ein Vergleich zwischen den Schichten (mit eventueller anschließender Auszeichnung) hinsichtlich der erzielten Einsparungen beim Ressourcenverbrauch einen zusätzlichen Ansporn darstellen.

Auf diese Weise konnten durch die Betrachtung der personellen Ausgangslage für jedes Unternehmen geeignete Motivationsstrategien abgeleitet werden, um die angestrebten Ressourceneinsparungen durch die aktive Einbindung und Förderung der Mitarbeiter zu erreichen. Darüber hinaus wurden die jeweils ermittelten Werte denen des Gesamtdurchschnitts aller beteiligten Unternehmen gegenübergestellt, um weiteren Aufschluss über den Ausprägungsgrad der Leistungsmotivation zu erhalten. Die Ergebnisse der einzelnen Unternehmen sind den Abbildungen 32 bis 35 im Anhang zu entnehmen.

AP 2: Auswählen von Pilotproduktionsprozessen

In den ersten Analysen wurden Wertströme aufgenommen und interne Qualitäts-, Entsorgungs- und Verbrauchsdaten gesichtet und ausgewertet. Dadurch wurden die Produktionsprozesse identifiziert, bei denen die größten Ressourcenverluste auftraten und zudem ein signifikanter Mitarbeitereinfluss bestand. In diesem AP wurden Vorarbeiten aus den Forschungsprojekten „Methods for Efficiency“³ und „ExpertME“⁴ genutzt. Unter anderem

³ METHODS FOR EFFICIENCY; gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.

wurden die dort bereits entwickelten Fragebögen und Ishikawa-Diagramme eingesetzt. Im Zuge der Analysen wurde eng mit den Spezialisten der beteiligten Unternehmen vor Ort zusammengearbeitet, die über entsprechendes Expertenwissen zum Betrieb der Produktionsprozesse verfügen. Auf Basis der Analysen fand eine Fokussierung auf vielversprechende Produktionsprozesse statt, die im Weiteren tiefergehend betrachtet wurden.

Beim Kooperationspartner Sebald Schleifscheiben ergab sich auf Grundlage der Auswertung der Abfall- und Ausschussdaten eine Fokussierung auf den Produktionsprozess Nacharbeit. Hier lagen die höchsten Materialverschwendungen vor, auf die der Mitarbeiter Einfluss hat (Tabelle 1).

Tabelle 1: Wahl des Pilotproduktionsprozesses Material - Sebald



Produktionsprozess	Materialverschwendungen	Ursache	Mitarbeiter-einfluss	Fokussierung
Lager	5 t/a	Überproduktion	gering	nein
Pressen	3 t/a	verschlissene Formen	mittel	nein
Brennen	5,5 t/a	Beschädigung beim Handling	hoch	nein
Nacharbeit	57,5 t/a	zu großes Übermaß	mittel	ja

Beim Kooperationspartner Lauterbach-Kießling GmbH (Hersteller von Betonbauteilen) wurden in den Produktionsprozessen Lagern, Mischen und Bearbeiten hohe Verschwendungen identifiziert (Tabelle 2). Eine Optimierung des Lagers wurde aufgrund des geringen Mitbeeinflusses als nicht zielführend erachtet. Zur Entscheidung ob der Fokus der weiteren Betrachtung auf die Bearbeitung der Betonrohnteile oder dem Mischprozess des Betons liegen sollte, wurden Experteninterviews und Untersuchungen von Anlagenparametern durchgeführt. Die Entscheidung, den Bearbeitungsprozess zu fokussieren, erfolgte aus der Tatsache, dass beim Mischen weit weniger Material aufgrund von fehlendem Wissen als aufgrund der veralteten Anlagentechnik verschwendet wird. Eine Modernisierung der Anlagentechnik ist gleichbedeutend mit hohen Investitionen und wäre mit der Forderung nach einer kurzen Amortisationszeit nicht vereinbar gewesen.

⁴ ExpertME – Das Expertenwissen der Mitarbeiter zur Verbesserung der Material- und Energieeffizienz nutzen; gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie.

Tabelle 2: Wahl des Pilotproduktionsprozesses Material - Lauterbach-Kießling



Produktionsprozess	Materialverschwendungen	Ursache	Mitarbeiter-einfluss	Fokussierung
Lagern	165 t/a	Überproduktion, Lagerstruktur	gering	nein
Mischen	308 t/a	Fehlendes Wissen, veraltete Anlagen	mittel	nein
Bearbeiten	190 t/a	Fehlende Transparenz	hoch	ja
Montieren	44 t/a	Unachtsamkeit	hoch	nein
Nacharbeiten	2,2 t/a	Beschädigung beim Handling	hoch	nein
Transportieren	44 t/a	Beschädigung beim Handling	hoch	nein

Beim Kooperationspartner Klubert + Schmidt GmbH (Hersteller von Abgasklappen) werden im Bereich der Großserienfertigung vor allem Gussteile zerspannt. Eine nähere Betrachtung und Optimierung der Produkte und Rohteilgeometrien hätte einer Produktneugestaltung geglichen und damit große Investitionssummen mit sich gebracht. Nach genauerer Analyse der Entsorgungs- und Ausschussdaten war die Fokussierung auf die Fräsbearbeitung aufgrund der hohen Materialverschwendungen eindeutig (Tabelle 3).

Tabelle 3: Wahl des Pilotproduktionsprozesse Material - Klubert + Schmidt



Produktionsprozess	Materialverschwendungen	Ursache	Mitarbeiter-einfluss	Fokussierung
Hebel/Wellenkomplex	0,5 t/a	Falsches Einlegen	hoch	nein
Fräsbearbeitung	9,9 t/a	Verschleiß, Einstellen	mittel	ja
Drosselklappe	0,2 t/a	Werkzeugverschleiß	mittel	nein
Montage	0,9 t/a	Werkzeugverschleiß	mittel	nein

Beim Kooperationspartner Federnfabrik Dietz GmbH (Hersteller von Federn und Stanz-Biegeteilen) war für eine weitere Fokussierung auf die Prozesse Einkauf, Warenannahme und Stanzen der jeweilige Mitarbeiterinfluss zu gering (Tabelle 4). Eine Optimierung der Werkzeugauslegung in der Konstruktion hätte einen großen personellen und finanziellen Aufwand zur Folge gehabt. Aufgrund der hohen Materialverschwendung und des hohen Mitarbeiterinflusses erfolgte die Fokussierung auf den Rüst- und Einrichteprozess.

Tabelle 4: Wahl des Pilotproduktionsprozesses Material - Federnfabrik Dietz



Produktionsprozess	Materialverschwendungen	Ursache	Mitarbeiterinfluss	Fokussierung
Einkauf	6,7 t/a	Nicht optimales Ausgangsmaterial	gering	nein
Warenannahme	3,3 t/a	Beschädigtes Ausgangsmaterial	gering	nein
Konstruktion	26,9 t/a	Werkzeugauslegung	mittel	nein
Stanzen	13,4 t/a	Materialeinzug zu breit	gering	nein
Rüsten / Einrichten	60,0 t/a	Schwieriges Einstellen	hoch	ja
Transport	0,5 t/a	Beschädigung beim Handling	hoch	nein

Neben dem Materialeinsatz wurde auch der Leistungsbedarf in jedem Unternehmen der Kooperationspartner gemessen. Wie bei der Materialbetrachtung wurde die Energie ebenfalls nach der Top-down-Methode analysiert.

Diese Methode wird verwendet, wenn nur wenige Teilinformationen zum Beispiel über die Effizienz verschiedener Maschinen vorliegen. Hierbei werden erst große Verbraucher energetisch analysiert. Anschließend werden weitere kleinere Verbraucher betrachtet. Dieses Vorgehen setzt sich fort, bis schließlich alle Verbraucher analysiert wurden. Das systematische Arbeiten mit der Methode ermöglicht die Schließung von Informationslücken. Somit kann der Detaillierungsgrad mit geringem Aufwand systematisch gesteigert werden, um beispielsweise den gesamten Effizienzgrad einer Produktionsanlage zu bestimmen. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt beschreiben:

Beim Kooperationspartner Sebald Schleifscheiben wurden neben der Beleuchtung auch die verschiedensten Produktionsanlagen und Maschinen energetisch erfasst (Tabelle 5). Aufgrund des niedrigen Leistungsbedarfs der Produktionsanlagen und dem geringen Anteil am Gesamtbedarf der Beleuchtung, wurde eine Glättung der Spitzenlast fokussiert. Ein

weiterer Grund dafür waren die starken Schwankungen im Lastprofil, wie sie in Abbildung 5 ersichtlich sind. Eine Glättung verspricht aufgrund des hohen Bereitstellungspreises, der für die Lastspitzen gezahlt werden muss, eine schnelle Amortisation. Zudem ist Sebald Schleifscheiben ein energieintensives Unternehmen und kann somit Lastspitzenmanagement nach DIN 50001 als Teil eines Energiemanagementsystems geltend machen.

Tabelle 5: Wahl des Pilotproduktionsprozesses Energie - Sebald



Ort / Anlage	Abteilung	Wirkleistung	Mitarbeiter-einfluss	Fokussierung
Beleuchtung	Mineralische Bearbeitung EG	3,3 kW	mittel	nein
	Mineralische Bearbeitung 1. EG	3,6 kW	mittel	nein
	Polybora Lauber	3,1 kW	mittel	nein
	Polybora Lager	1,7 kW	mittel	nein
	Nachbearbeitung	5,6 kW	mittel	nein
	Pressen	2,6 kW	mittel	nein
Anlagen / Maschinen	Kompressor	23 kW	gering	nein
	Pressen 2	10 kW	gering	nein
	TNV	17 kW	gering	nein
	Absaugung 1	15 kW	gering	nein
	Absaugung 2	15 kW	gering	nein
	Bakalitofen CHI	32 kW	gering	nein
	Bakalitofen DEU	17 kW	gering	nein
Spitzenlast	Spitzenlast 37 % über Durchschnittlast		hoch	ja

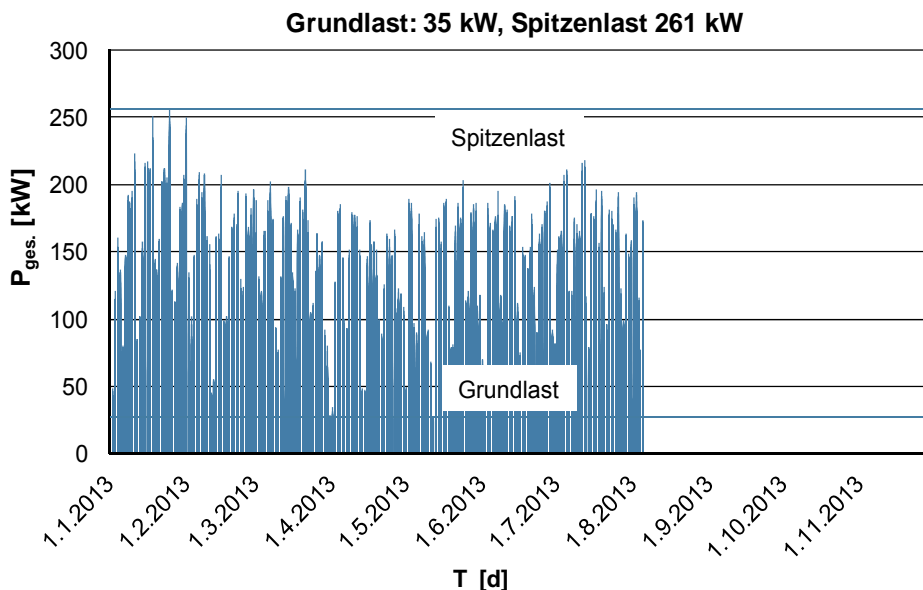


Abbildung 5: Elektrischer Lastgang Sebald

Beim Kooperationspartner Lauterbach-Kießling GmbH wurde ebenfalls der Lastgang auf Werksebene erhoben. Hier ist die Differenz der Spitzenlast zur Durchschnittslast mit 40 % zwar höher, jedoch ist der Leistungsbedarfbedarf und damit der Bereitstellungspreis niedriger. Nach einer Analyse der im Unternehmen bestehenden Anlagen (Tabelle 6) wäre aufgrund des hohen Leistungsbedarfs und einem mittleren Mitarbeiterinfluss zunächst eine Fokussierung auf den äußeren Portalkran möglich gewesen. Einer Optimierung des Leistungsbedarfs müsste allerdings eine Optimierung der Lagerlogistik vorausgehen, da dieses Potenzial weit höher ist als durch eine Verringerung durch mitarbeiterbedingte Verschwendungen.

Tabelle 6: Wahl des Pilotproduktionsprozesses Energie - Lauterbach-Kießling



Ort / Anlage	Abteilung	Wirkleistung	Mitarbeiterinfluss	Fokussierung
Beleutung	Halle 1	14 kW	hoch	ja
	Halle 2	12 kW	hoch	ja
Anlagen	Portalkran Halle 1	15 kW	gering	nein
	Mischanlage Halle	48 kW	gering	nein
	Portalkran außen	52 kW	mittel	nein
	Heizung Portalkran	4 kW	hoch	nein
Spitzenlast	Spitzenlast 43 % über Durchschnittslast		hoch	nein

Beim Kooperationspartner Klubert + Schmidt wurden neben der Beleuchtung auch verschiedene Peripherieanlagen und Druckluftkompressoren analysiert (Tabelle 7). Aufgrund des hohen Leistungsbedarfs der Druckluftkompressoren und des gleichzeitig hohen Mitbeeinflusses beim Druckluftverbrauch beim Ausblasen gefräster und gedrehter Baugruppen, wurde hierauf der Fokus weiterer Betrachtungen gelegt.

Tabelle 7: Wahl des Pilotproduktionsprozesses Energie - Klubert + Schmidt



Ort / Anlage	Abteilung	Wirkleistung	Mitarbeiter-einfluss	Fokussierung
Beleuchtung	Wareneingang	1,6 kW	mittel	nein
	Sozialräume Halle 1	8 kW	mittel	nein
	Sozialräume Halle 2	0,6 kW	mittel	nein
Anlagen / Maschinen	Rollwaschanlage	8 kW	gering	nein
	PCs	3,3 kW	hoch	nein
Druckluft	Halle 1	75 kW	hoch	ja
	Halle 2	50 kW	hoch	ja

Beim Kooperationspartner Federnfabrik Dietz wurden neben der Beleuchtung auch die Stanz-, Biege- und Federautomaten elektrisch vermessen (Tabelle 8). Hier wurde einhergehend mit der Optimierung der Rüst- und Einstellprozesse bei der Ressource Material (Tabelle 4) der Leistungsbedarf eines Biegeautomaten analysiert, um mögliche Synergien einer gemeinsamen Visualisierung beider Ressourcen nutzbar zu machen.



Abbildung 6: Stanz-Biegeautomat

Tabelle 8: Wahl des Pilotproduktionsprozesses Energie - Federnfabrik Dietz



Ort / Anlage	Abteilung	Wirkleistung	Mitarbeiter-einfluss	Fokussierung
Beleuchtung	Biegeabteilung	16,5 kW	mittel	nein
	ASE	6,7 kW	mittel	nein
Biegeautomaten	BA 11	5,1 kW	gering	ja
	BA 29	3,9 kW	gering	nein
	BA 24 v2	3,2 kW	gering	nein
	BA 25	3,1 kW	gering	nein
	BA 30	2,9 kW	gering	nein
	BA 18	2,5 kW	gering	nein
	BA 12	2,1 kW	gering	nein
Federautomaten	FA 80	4,6 kW	gering	nein
	FA 77	3,2 kW	gering	nein
	FA 23	3,1 kW	gering	nein
	FA 12	2,9 kW	gering	nein
	FA 69	1,2 kW	gering	nein

AP 3: Festlegen und Erfassen von Verbrauchskennwerten im Status-Quo

In AP 3 wurden für die ausgewählten, ressourcenintensiven Produktionsprozesse geeignete Verbrauchskennwerte festgelegt und erfasst. Mittels dieser konnte anschließend eine Ressourceneffizienzsteigerung an den Pilotproduktionsprozessen anschaulich aufgezeigt werden. Diese Kennwerte wurden von den Wissenschaftlern des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik in enger Abstimmung mit Experten der Kooperationspartner entwickelt. Wichtige Eigenschaft dieser Kennwerte ist es, dass sie mit minimalem Aufwand kontinuierlich gebildet werden können, um die zu entwickelnde Messtechnik kostengünstig zu realisieren. Das Ergebnis des Arbeitspaketes lässt sich wie folgt darstellen:

Tabelle 9: Ergebnis des AP 3

Unternehmen	Prozess / Anlage	Kennwerte	Bezug
Sebald Schleifscheiben	Abrasionsmischung	Gewicht [kg], Dicke [mm]	Rohprodukt zu Endprodukt
Sebald Schleifscheiben	Strom Spitzenlast	Leistung [kWh]	Aktuelle Spitzenlast zu vergangener Spitzenlast
Lauterbach-Kießling	Betonmischung im Trichter	Füllstand im Trichter [mm]	Restmenge im Trichter zu Schichtende
Lauterbach-Kießling	Ausschuss beim Entschalen	Ölverbrauch [ml/Form]	Einhaltung der Mindestmenge beim Einölen der Schalen
Lauterbach-Kießling	Ausschuss - schräges herausziehen aus der Form	Position: y [cm]; x [cm]	Optimale Position des Krans zur Produktionsgrube
Lauterbach-Kießling	Ausschuss - Pendeln der Form am Kran	Wartezeit [sec]	Referenzwert bis Stillstand der Form
Lauterbach-Kießling	Strom Beleuchtung	Leistung [kWh]	Aktueller Verbrauch im Vergleich zum ursprünglichen Verbrauch
Federnfabrik Dietz	Material Einstell/Rüstprozess	Materialeinzug [mm]	Aktueller Verbrauch im Vergleich zum ursprünglichen Verbrauch
Federnfabrik Dietz	Strom Einstell/Rüstprozess	Leistung [kWh]	Aktueller Verbrauch im Vergleich zum ursprünglichen Verbrauch
Klubert + Schmidt	Ausschuss durch Werkzeugverschleiß / falsches Einstellen	Ausschuss [Stück]	Aktueller Ausschuss im Vergleich zum ursprünglichen Verbrauch
Klubert + Schmidt	Druckluft	Verbrauch [l/Stück]	Aktueller Verbrauch im Vergleich zum ursprünglichen Verbrauch

Eine Abweichung der Ergebnisse der AP 1 bis 3 im Vergleich zum Projektantrag ergab sich lediglich hinsichtlich der angestrebten Pilotanwendungen bei Sebald Schleifscheiben. Bei der im Antrag als erfolgsversprechend beschriebene Optimierung der Temperaturführung der Produktionsanlagen zeigte sich, dass der Mitarbeiter hier kaum einen Einfluss hat. Vielmehr handelt es sich hierbei um eine spezifische Modernisierung bestehender Anlagen und Anlagensteuerungen. Stattdessen wurde ein auf Mitarbeitermotivation basiertes Lastspitzenmanagement eingeführt. Im Vergleich zu einer spezifischen Modernisierung bestehender Anlagen und Anlagensteuerungen kann dieser Ansatz Teil der DIN 50001 sein und lässt sich damit auf viele weitere KMUs übertragen. Durch die Übertragbarkeit dieses

Ansatzes steigt der gesellschaftliche Mehrwert dieses Projektes im Vergleich zu der im Antrag angestrebten spezifischen Pilotanwendung.

Unerwartete Herausforderungen traten bei der Bearbeitung der AP 1 bis 3 nicht auf. Vielmehr wurde der Status-Quo der teilnehmenden Kooperationspartner in einem zielführenden Detaillierungsgrad abgebildet, um im nächsten Unterabschnitt eine optimale Detailplanung ressourcensparender Interventionen durchzuführen.

3.1.2 Detailplanung ressourcensparender Interventionen

Die Wissenschaftler des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik und des Forschungsinstituts Betriebliche Bildung planten, wie in diesem Abschnitt beschrieben, die ressourceneinsparenden Interventionen im Detail.

Dafür wurden:

- in AP 4 die Einflussmöglichkeiten der Mitarbeiter zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs an den Pilotproduktionsprozessen bestimmt,
- in AP 5 die Visualisierungs- und Motivationssystematik entwickelt,
- und in AP 6 die zur Visualisierung notwendigen Messgrößen identifiziert und die erforderliche Messtechnik spezifiziert.

AP 4: Bestimmen der Einflussmöglichkeiten der Mitarbeiter

Ziel des AP 4 war es, die Einflussmöglichkeiten der Mitarbeiter zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs in den Pilotproduktionsprozessen zu bestimmen. Dazu erstellten Wissenschaftler des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik eine Übersicht der Möglichkeiten, mittels derer Mitarbeiter die Ressourceneffizienz an den ausgewählten Produktionsprozessen konkret steigern können. Dies erforderte ein umfassendes Verständnis der Funktionsweise der Produktionsanlagen, wozu eine tiefgehende Analyse der ausgewählten Prozesse notwendig war. Bei der Ressource Material wurden hierfür die Ursachen der Verschwendungen an Pilotprozessen ermittelt und deren Anteil am Gesamtmaterialverlust sowie deren monetärer Einfluss auf die Unternehmensbilanz ermittelt. Im Gegensatz zur Ressource Energie fehlten jedoch universell einsetzbare Messsysteme, um Potenziale zu bestimmen. Daher wurde von den Wissenschaftlern des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik eine Systematik entwickelt, die es erlaubt monetäre und mengenmäßige Abschätzungen zu treffen. Hierbei wird eine aufwandsoptimale Genauigkeit erreicht, um Potenziale zu bestimmen.

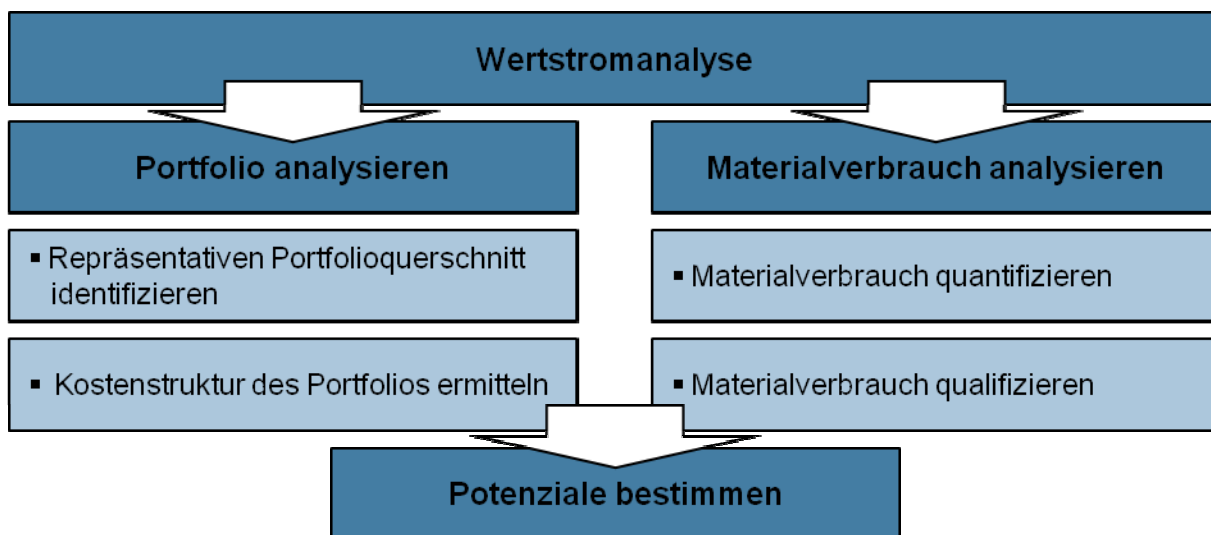


Abbildung 7: Vorgehen zur Potenzialbestimmung

Dieses Vorgehen wurde im Leitfaden „Ressourceneffizienz im Unternehmen: Einsparpotenziale sichtbar machen – Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen motivieren“, der im Rahmen dieses Projektes entstand, detailliert beschrieben und soll zukünftig KMUs helfen, ihre Materialeffizienz zu analysieren und zu verbessern. Die Gliederung des Leitfadens ist folgender Abbildung zu entnehmen.

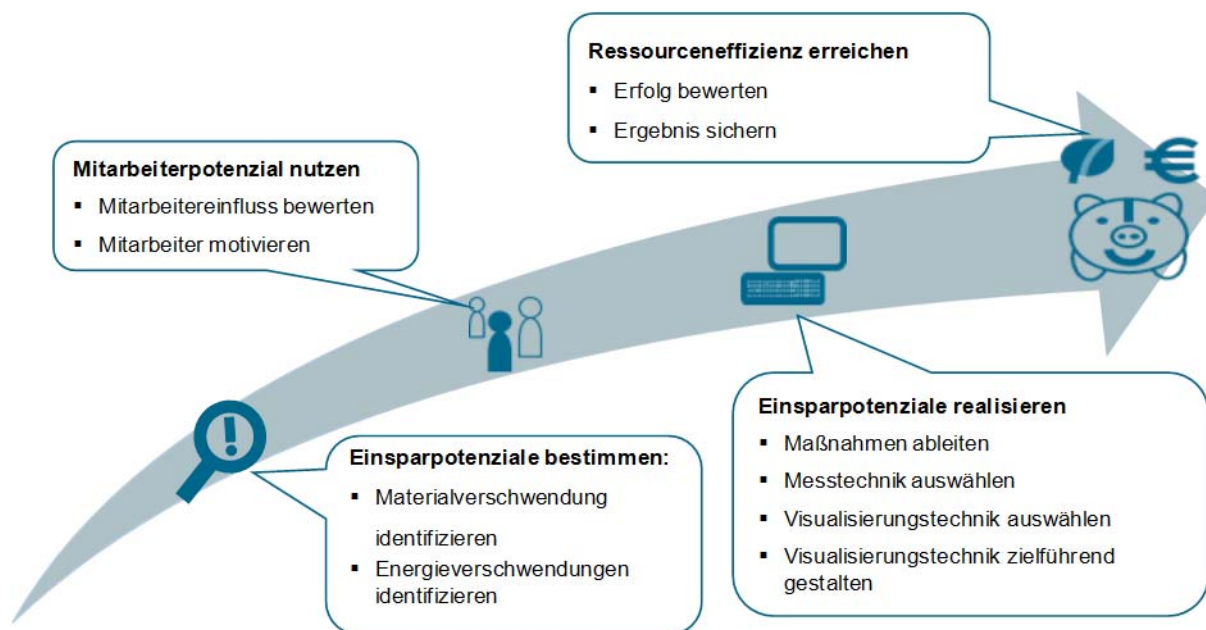


Abbildung 8: Gliederung des Leitfadens

Neben den Einflussmöglichkeiten der Mitarbeiter wurden die identifizierten Pilotproduktionsprozesse in den Unternehmen der Kooperationspartner detaillierter betrachtet und die genaue Einflussnahme durch den Mitarbeiter herausgearbeitet. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt darstellen:

Beim Kooperationspartner Sebald Schleifscheiben kann in dem betrachteten Pilotproduktionsprozess der Nacharbeit von Schleifscheiben ein Großteil der Verlustmenge durch eine Reduzierung des Ausgangsmaterials erreicht werden. Die Menge des Ausgangsmaterials wird in der Arbeitsvorbereitung festgelegt. Stichproben der Wissenschaftler des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik ergaben eine Überdimensionierung des Ausgangsmaterials um bis zu 42 %.

Das angestrebte Ziel der Visualisierung bei der Ressource Material war es, den Mitarbeitern in der Arbeitsvorbereitung die nötigen Informationen zur Reduzierung des Ausgangsmaterials in Echtzeit zur Verfügung zu stellen und eine dauerhafte Sensibilisierung zum materialeffizienten Verhalten zu garantieren.

Das Ziel der angestrebten Visualisierung bei der Ressource Energie ist es, die Spitzenlast in Echtzeit darzustellen. Um den Mitarbeiterinfluss auf die Spitzenlast zu erhöhen, werden diese schon vor dem Überschreiten der bisherigen Spitzenlast informiert werden, um diesen so einen Handlungsspielraum zur Reduzierung zu ermöglichen. Des Weiteren wird ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP) angestrebt, der es ermöglicht, die Spitzenlast langfristig zu senken.

Tabelle 10: Einflussnahme durch Mitarbeiter beim Materialeinsatz - Sebald



Ursache	Verlustmenge [t]	Verlustmenge [€]	Anteil am Gesamtmaterial-einsatz	Einflussnahme durch Mitarbeiter
Handling Nacharbeit	9,5	47.737,50 €	2,62%	Erhöhung der Achtsamkeit
Falsche Nacharbeit	5	25.125,00 €	1,38%	Erhöhung der Achtsamkeit
Nacharbeit: Planieren	19	95.475,00 €	5,23%	Reduzierung des Ausgangsgewichts
Nacharbeit der Maße	12	60.300,00 €	3,31%	Reduzierung des Ausgangsgewichts
Nacharbeit: Profilieren	12	60.300,00 €	3,31%	Reduzierung des Ausgangsgewichts



Abbildung 9: Mitarbeiter beim Profilieren (links) und beim Planieren (rechts)

Tabelle 11: Einflussnahme durch Mitarbeiter beim Materialeinsatz - Lauterbach-Kießling



Ursache	Verlustmenge [t]	Verlustmenge [€]	Anteil am Gesamtmaterial-einsatz	Einflussnahme durch Mitarbeiter
Betonmischung im Trichter nach Schichtende	168	4.032	4,12%	Weniger Beton bestellen
Ausschuss beim Entschalen	16,5	396	0,40%	Sorgfältigerer Gebrauch von Öl
Schräges herausziehen aus der Form	4,4	105,6	0,11%	Sorgfältigere Kransteuerung
Pendeln der Form am Kran	1	24	0,02	Höhere Wartezeit

Beim Kooperationspartner Lauterbach-Kießling hat der Mitarbeiter vor allem einen Einfluss auf die Verlustmengen im Betontrichter (Fassungsvolumen 7,5 m³) zum Schichtende. Er hat die Möglichkeit, die passende Menge an Material zu bestellen. Dafür benötigt er jedoch Transparenz bezüglich der vorhandenen Betonmenge im Trichter. Ziel der Visualisierung war es daher, für diese Transparenz des Füllstandes zu sorgen, sowie den Mitarbeiter für einen ressourcenschonenden Umgang zu sensibilisieren.

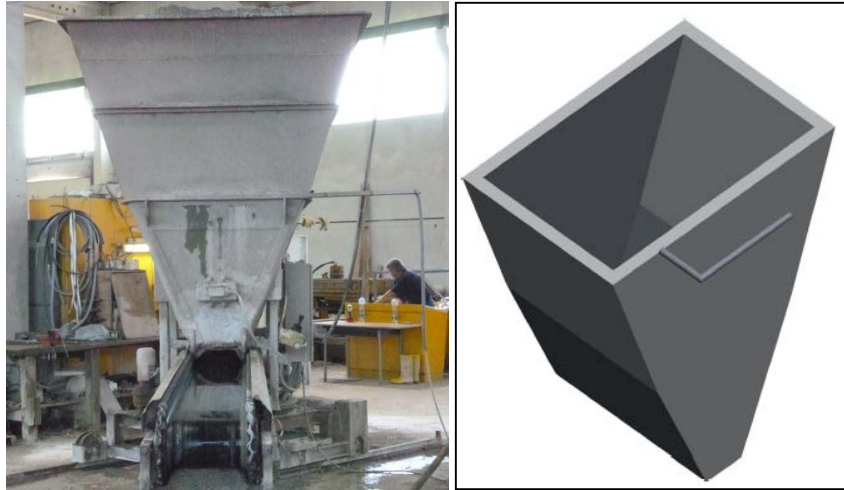


Abbildung 10: Betontrichter Lauterbach-Kießling

Bei der Ressource Energie hat der Mitarbeiter Einfluss auf den Leistungsbedarf der Hallenbeleuchtungen. Er soll durch die Visualisierung motiviert werden, die Hallenbeleuchtung in Bereichen, in denen nicht gearbeitet wird, auszuschalten. Hierfür soll ein Anreiz, sowie eine dauerhafte Sensibilisierung für die Kosten des Leistungsbedarfs geschaffen werden. Im Vorfeld dieser Intervention musste noch die Schalterbelegung der Hallenbeleuchtung modifiziert werden. Dafür wurden die Schalter so gelegt, dass die Beleuchtungsregulierung nicht mehr bahnweise, sondern bereichsweise erfolgen konnte. Ein Vorher-Nachher-Vergleich der Schalterbelegung ist Abbildung 36 im Anhang zu entnehmen.

Beim Kooperationspartner Klubert + Schmidt wurde in den Analysen deutlich, dass der Mitarbeiter auf die Hauptursache der Verschwendungen, den Materialausschuss aufgrund von Lunkern, keinen Einfluss hat, da die Rohteile von einem externen Lieferanten bezogen werden. Die weiteren Verschwendungsursachen, auf die Mitarbeiter erheblichen Einfluss haben, sind jedoch so gering, dass eine schnelle Amortisation der Intervention nicht gegeben ist. Daher wurde ab AP 4 von einer Intervention im Bereich der Materialeffizienz abgesehen. Bei der Ressource Energie wurde der Druckluftverbrauch optimiert. Hier hat der Mitarbeiter Einfluss darauf, wie viel Druckluft zum Abblasen von Bauteilen nach der Fräsbearbeitung verbraucht wird. Ziel der Visualisierung ist es daher, den Mitarbeiter für seinen Druckluftverbrauch zu sensibilisieren.

Tabelle 12: Einflussnahme durch Mitarbeiter beim Materialeinsatz - Klubert + Schmidt



Ursache	Verlustmenge [t]	Verlustmenge [€]	Anteil am Gesamtmaterial-einsatz	Einflussnahme durch Mitarbeiter
Falsches Einstellen	0,13	1.130 €	0,09%	Verbesserung durch höhere Prozesskenntnis
Einstellen nach Produktwechsel	0,13	1.130 €	0,09%	Verbesserung durch höhere Prozesskenntnis
Erneutes Einstellen nach Werkzeugdefekt	0,13	1.130 €	0,09%	Verbesserung durch höhere Prozesskenntnis
Erneutes Einstellen nach Werkzeugverschleiß	0,13	1.130 €	0,09%	Verbesserung durch höhere Prozesskenntnis
Lunkerbildung	6,70	58.200 €	4,41%	Keinen

Beim Kooperationspartner Federnfabrik Dietz wurden in dem betrachteten Pilotproduktionsprozess beim Rüsten bzw. Einstellen erhebliche Materialverluste identifiziert werden. In den Prozessanalysen wurde deutlich, dass erfahrene Mitarbeiter als Wissensträger beim Einstellen eine höhere Prozesskenntnis haben als unerfahrene Mitarbeiter. Durch die Steigerung der Prozesskenntnisse lassen sich fast alle Ursachen für Materialverschwendungen verbessern (Tabelle 13). Zudem lässt sich durch eine Erhöhung der Prozesskenntnisse der Mitarbeiter auch der Leistungsbedarf beim Umrüsten der Maschine reduzieren (Abbildung 10). Die Reduzierung des Leistungsbedarfs geht mit der Reduzierung des Materialverbrauchs einher. So müssen beim Einstellen von Stanz-Biegeautomaten weniger Vorschubmotoren laufen und weniger Stanzprozesse stattfinden, bis die finalen Einstellungen gefunden sind.

Tabelle 13: Einflussnahme durch Mitarbeiter beim Materialeinsatz - Federnfabrik Dietz



Ursache	Verlustmenge [t]	Verlustmenge [€]	Anteil am Gesamtmaterialeinsatz	Einflussnahme durch Mitarbeiter
Falsches Einstellen	6,0	25.200	1,15%	Höhere Achtsamkeit
Einstellen nach dem Rüsten	22,5	94.700	4,33%	Verbesserung durch höhere Prozesskenntnis
Erneutes Einstellen aufgrund von Qualitätsmängeln	26,9	113.200	5,17%	Verbesserung durch höhere Prozesskenntnis
Erneutes Einstellen aufgrund von Werkzeugverschleiß	3,0	12.600	0,58%	Präventive Wartungsintervalle, Verbesserung durch höhere Prozesskenntnis
Erneutes Einstellen aufgrund von Werkzeugbeschädigung	2,0	8.400	0,38%	Präventive Wartungsintervalle, Verbesserung durch höhere Prozesskenntnis

Das Ziel der angestrebten Visualisierung bei der Federnfabrik Dietz war es daher, einen Wissenstransfer von erfahrenen Mitarbeitern zu weniger erfahrenen Mitarbeitern zu fördern.

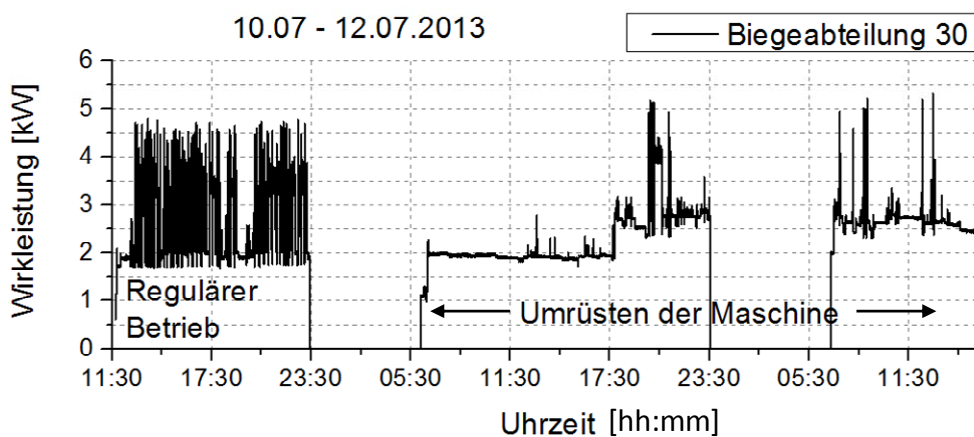


Abbildung 11: Leistungsaufnahme eines Stanz-Biegeautomaten

AP 5: Entwicklung der Visualisierungs- und Motivationssystematik

Ziel des AP 5 war es, eine Visualisierungs- und Motivationssystematik auf Grundlage der in AP 4 ermittelten Einflussnahme der Mitarbeiter zu entwickeln. Vor dem Hintergrund des Ausprägungsgrades der vorhandenen Eigenmotivation der Mitarbeiter (AP 1) wurde von den Wissenschaftlern des Forschungsinstituts Betriebliche Bildung und des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik eine passgenaue Systematik aufgestellt, mittels derer die Motivation der Mitarbeiter in gewünschter Weise gesteigert werden kann. Dies umfasst sowohl die Ausgestaltung von Anreizen (z.B. Wettbewerb zwischen Mitarbeitern, Belohnungen) als auch die passende Visualisierungstechnik. Diese Systematik ist Grundlage der in REVisER entwickelten Software „Effizienzsteigernde Methoden der Motivation“, kurz EffMeMo. Diese Software wird zusammen mit einem im Projekt entstandenen Leitfaden bereitgestellt und ermöglicht dem Anwender, für die unternehmensspezifische Ursache der Ressourcenverschwendung die optimale Motivationsmethode zu finden. Durch die transparente Ausgestaltung der Software ist ein hoher Lerneffekt beim Anwender bezüglich Ressourcenverschwendungen und Motivationsmethoden sichergestellt. Die Auswahl erfolgt in vier Schritten:

1. Eingabe der Unternehmenseigenschaften (Größe, Schichtsystem,...)
2. Eingabe der zu betrachteten Ressource
3. Eingabe des Ausschussbereichs und der Ausschussursache
4. Empfehlung der Motivationsmethode

Unternehmenseigenschaften und Ausschussbereich bzw. Ausschussursache sind Auswahlkriterien für geeignete Motivationsmethoden, sodass der Anwender nach Eingabe dieser Daten eine spezifizierte Vorauswahl an Motivationsmethoden vorgeschlagen bekommt. Nach der Auswahl der Motivationsmethode erhält der Anwender eine detaillierte Beschreibung und Hilfestellungen zur Implementierung der ausgewählten Methode. Screenshots der PC-Anwendung sind dem Anhang (Abbildungen 37 bis 41) zu entnehmen.

Zur Auswahl der richtigen Visualisierungstechnik wurde eine Systematik entwickelt, die zwischen bestimmenden und flexiblen Merkmalen unterscheidet. Aus der Auswahl der bestimmenden Merkmale ergibt sich zwangsläufig die einzusetzende Visualisierungstechnik. Bestimmende Merkmale sind neben den Kosten auch eine Reihe anderer Merkmale, die vor einer Beschaffung bestimmt werden müssen. Dazu zählen die Leseentfernung, die Lichtstärke im Umfeld der Visualisierungstechnik, die gewünschte Informationsmenge der Darstellung, die gewünschte Interaktion mit dem Benutzer und der Wartungsaufwand. Einen Überblick der Visualisierungstechniken gibt Tabelle 14.

Tabelle 14: Bestimmende Merkmale der Visualisierungstechnik

Visualisierungstechnik	max. Leseentfernung	Lichteinfall	Informationsmenge	Interaktion mit Benutzer	Kosten	Wartungsaufwand
Tablet-PC's	5 m	stark störend	sehr hoch	hoch	mittel - hoch	mittel - hoch
TFT-Monitor	15 m	störend	hoch	hoch	mittel - hoch	mittel - hoch
LED-Monitor, numerisch	120 m	nicht störend	gering	gering	niedrig - mittel	gering
LED-Monitor, alpha-numerisch	110 m	nicht störend	gering - mittel	gering - mittel	niedrig - hoch	gering

Im Gegensatz zu den bestimmenden Merkmalen können die flexiblen Merkmale an jede Visualisierungstechnik angepasst werden und sind ebenso vor der Beschaffung festzulegen. Diese ergibt sich aus der Entscheidung, wie und in welchem Umfeld die Visualisierungstechnik angebracht werden soll und wie die Kommunikation mit den Sensoren oder der Recheneinheit stattfinden soll. Die Merkmale sind Schutzklasse (siehe Anhang: IP-Schutzklassen), Schnittstelle, Befestigung und Gehäuse.

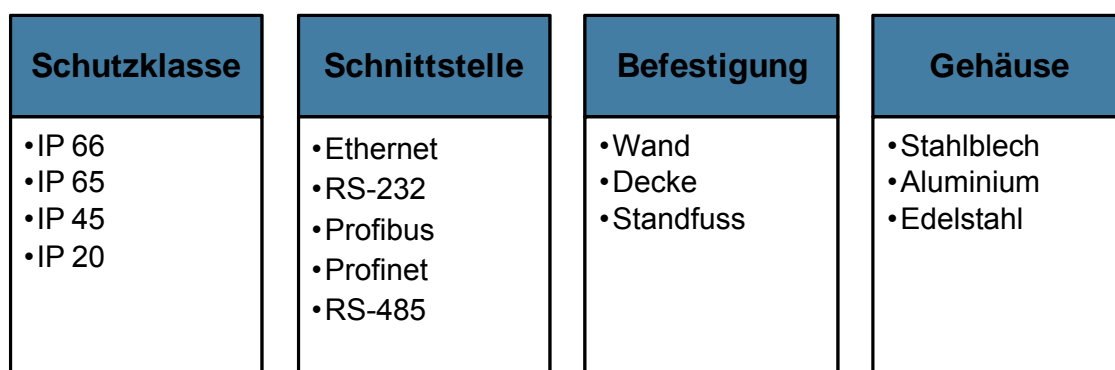


Abbildung 12: Flexible Merkmale der Visualisierungstechnik

Ein weiteres Ergebnis des AP 5 ist die Auswahl der Darstellung und der Visualisierungstechniken der Interventionen bei den Kooperationspartnern (Tabelle 15).

Tabelle 15: Wahl der Visualisierungstechnik und Darstellungsmöglichkeiten

Unternehmen	Gewünschtes Verhalten	Visualisierungstechnik	Darstellung	Anreiz
Sebald Schleifscheiben	Reduzierung des Ausgangsgewichtes	TFT-Monitor	Grafik eingespartes Material	Anzeige des gesparten Materials
Sebald Schleifscheiben	Glättung von Lastspitzen	TFT-Monitor	Ampel, Echtzeitlastspitzen	Ampel zum Stromverbrauch
Lauterbach-Kießling	Bestellung der richtigen Betonmenge	LED-Monitor, alphanumerisch	Restmenge, Fließtext Schichtende	Apell an das Mitarbeiterverhalten
Lauterbach-Kießling	Reduzierung der Beleuchtung	LED-Monitor, alphanumerisch	Aktueller Verbrauch, kummulierte Ersparnis	Beteiligung an der Ersparnis
Federnfabrik Dietz	Reduzierung des Materialverbrauchs beim Einstellen	Tablet-PC's	Ampel, aktueller und durchschnittlicher Materialverbrauch	Vergleich zu vorherigen Rüstprozessen
Klubert + Schmidt	Reduzierung des Druckluftverbrauchs	Tablet-PC's	Verbrauch und Kosten, kumulierter Tagesverbrauch	Vergleich zu Vortagen

AP 6: Identifizieren der zur Visualisierung notwendigen Messgrößen und spezifizieren der erforderlichen Messtechnik

Ziel des AP 6 war es, geeignete Messsysteme zu identifizieren und weiterzuentwickeln, die bei ausreichender Genauigkeit das gewünschte Messergebnis zu geringen Anschaffungskosten liefern. Gleichzeitig mussten andere produktionsrelevante Aspekte beachtet werden, wie eine einfache Bedienbarkeit oder Zuverlässigkeit. Die Entwicklung dieser Messsysteme sowie eine damit verbundene Lösung zur Verarbeitung der Messdaten übernahmen die Wissenschaftler des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik. Das Ergebnis lässt sich wie folgt darstellen:

Tabelle 16: Identifizierte Messgrößen und Messtechnik

Unternehmen	Messgröße	Visualisierungstechnik	Erforderliche Messtechnik	Schnittstellen
Sebald Schleifscheiben	Gewicht und Scheibendicke vor und nach einer Optimierung	TFT-Monitor,	netzfähige Waage, Laserdistanzsensor, Recheneinheit, USB-Adapter	RS-232 auf USB
Sebald Schleifscheiben	Lastspitzen des Unternehmens	TFT-Monitor	Leistungsmessklemme mit Stromwandler, Buskoppler, Recheneinheit, Switch	Ethernet
Lauterbach-Kießling	Füllhöhe des Trichters	LED-Monitor, alphanumerisch	Laserdistanzsensor, Recheneinheit	RS-232
Lauterbach-Kießling	Stromverbrauch der Beleuchtung	LED-Monitor, alphanumerisch	Leistungsmessklemme mit Stromwandler, Buskoppler, Recheneinheit,	Ethernet
Federnfabrik Dietz	Materialverbrauch im Rüstbetrieb	Tablet-PC's	Stromsensoren, Inkrementalgeber, Messkarten, Recheneinheit	USB, Ethernet
Klubert + Schmidt	Druckluftverbrauch	Tablet-PC's	Druckluftmessstrecke, Recheneinheit	RS-232

Zur Messung von Energieverbräuchen wurden Stromwandler und Buskoppler eingesetzt. Eine Kombination der beiden Komponenten liefert bei geringen Investitionskosten eine hohe Genauigkeit. Als Recheneinheit eignet sich ein handelsüblicher PC oder ein im Monitor

verbauter Embedded-PC oder Hutschienen-PC sowie eine SPS⁵. Als Schnittstellen eignet sich besonders Ethernet. Die Vorteile dieses Bussystems sind günstige Anschaffungskosten, geringer Installationsaufwand und ein einfacher Aufbau. Eine Datenübertragung ist auch über WLAN realisierbar. Die verschiedenen Möglichkeiten des Aufbaus und der Datenübertragung sind beispielhaft in Abbildung 13 ersichtlich.

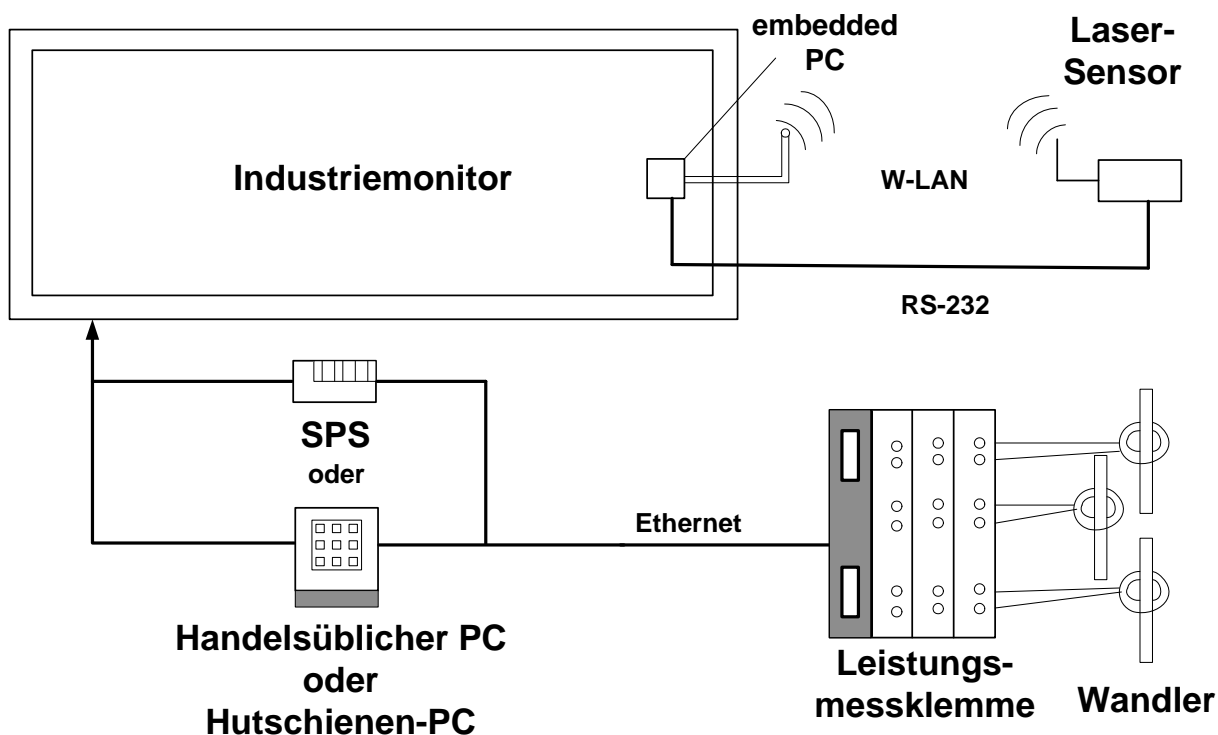


Abbildung 13: Geeignete Messtechnik und Schnittstellen

Zur Erfassung der Materialverbräuche bei den Kooperationspartnern Sebold Schleifscheiben und Lauterbach-Kießling wurden Lasersensoren eingesetzt. Lasersensoren sind besonders ausgereift und liefern auch im niedrigen Preissegment höchste Genauigkeit. Beim Kooperationspartner Federnfabrik Dietz erfolgte die Erfassung des Materialverbrauchs mit einem Inkremantalgeber, der mit einer Laufrolle mit dem Materialeinzug der Stanz-Biegeautomaten verbunden war. Die Erfassung des Druckluftverbrauches beim Kooperationspartner Klubert + Schmidt wurde mit einer Druckluftmesssonde durchgeführt. Zur Anschaffung dieser Sonde müssen verhältnismäßig hohe Investitionen berücksichtigt werden.

Bezogen auf die im Projektantrag als erfolgsversprechend erachteten Maßnahmen, konnte die angestrebte Pilotanwendung bei Klubert + Schmidt nicht umgesetzt werden. Der Grund dafür war, dass der Mitarbeiter auf die im Antrag noch beschriebene Reduktion des

⁵ Eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS, englisch: *Programmable Logic Controller, PLC*) ist ein Gerät, das zur Steuerung oder Regelung einer Maschine oder Anlage eingesetzt und auf digitaler Basis programmiert wird.

Ausschusses durch optimales Rüsten keinen Einfluss hat. Das Erkennen dieses Sachverhaltes bedurfte aufwendiger Detailanalysen und war in der Phase der Antragsstellung nicht möglich.

Die von den Wissenschaftlern des Lehrstuhl Umweltgerecht Produktionstechnik und des Forschungsinstitut Betriebliche Bildung entwickelte Intervention ist für viele Unternehmen von großer Relevanz, da Studien folgend etwa 7 % der elektrischen Energie in Unternehmen zum Betrieb von Druckluftanlagen eingesetzt werden [Rad01]. Weitere unerwartete Probleme sind bei der Bearbeitung der AP 4 bis 6 nicht aufgetreten. Es ist gelungen, die Detailplanung der Interventionen gemäß dem Antrag abzuschließen. Weiterhin wurde, eine Motivationssystematik entwickelt, die die Vorgaben aus dem Antrag hinsichtlich der betrachteten Einflussfaktoren auf die Auswahl der Motivationsmethoden voll erfüllt. Um diese Forschungsleistung einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen, wird diese Motivationssystematik als Softwareanwendung gemeinsam mit dem Leitfaden vertrieben.

3.1.3 Anwendung und Validierung

Im folgenden Unterabschnitt wird die Anwendung der entwickelten Systematik als Intervention bei den Kooperationspartnern beschrieben und deren Validierung skizziert.

Dafür werden:

- in AP 7 die Implementierung der Mess- und Visualisierungstechnik sowie der Motivationssystematik beschrieben und
- in AP 8 die Dokumentation der Einsparungen sowie die Evaluierung der Wirkung unterschiedlicher Arten an Visualisierung und Anreizen skizziert.

AP 7: Implementierung der Mess- und Visualisierungstechnik sowie der Motivationssystematik

Ziel des AP 7 war die Implementierung der entwickelten Mess- und Visualisierungstechnik sowie der Motivationssystematik vor Ort an den Pilotprozessen bei den Kooperationspartnern. Das erfolgte in enger Abstimmung mit den Produktionsverantwortlichen der Unternehmen, um den normalen Produktionsbetrieb möglichst wenig zu beeinträchtigen. Der Aufbau der Mess- und Visualisierungstechnik erfolgte durch die Wissenschaftler des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik.

Ein entscheidender Erfolgsfaktor war hierbei eine frühzeitige Einbindung der Mitarbeiter in der Produktion. Nur wenn diese die geplanten Maßnahmen zur

Ressourceneffizienzsteigerung verstehen und nachvollziehen können, werden sie die Optimierungsmaßnahmen mittragen.

Für Unternehmen stellt der richtige Umgang mit Veränderungen, auch Change-Management genannt, eine große Herausforderung dar. Nicht selten reagieren die betroffenen Mitarbeiter zunächst verunsichert und leisten Widerstand. Daher kam auch bei ReViSER der systematischen Vorgehensweise von Projektbeginn an eine grundlegende Bedeutung zu (Abbildung 14).

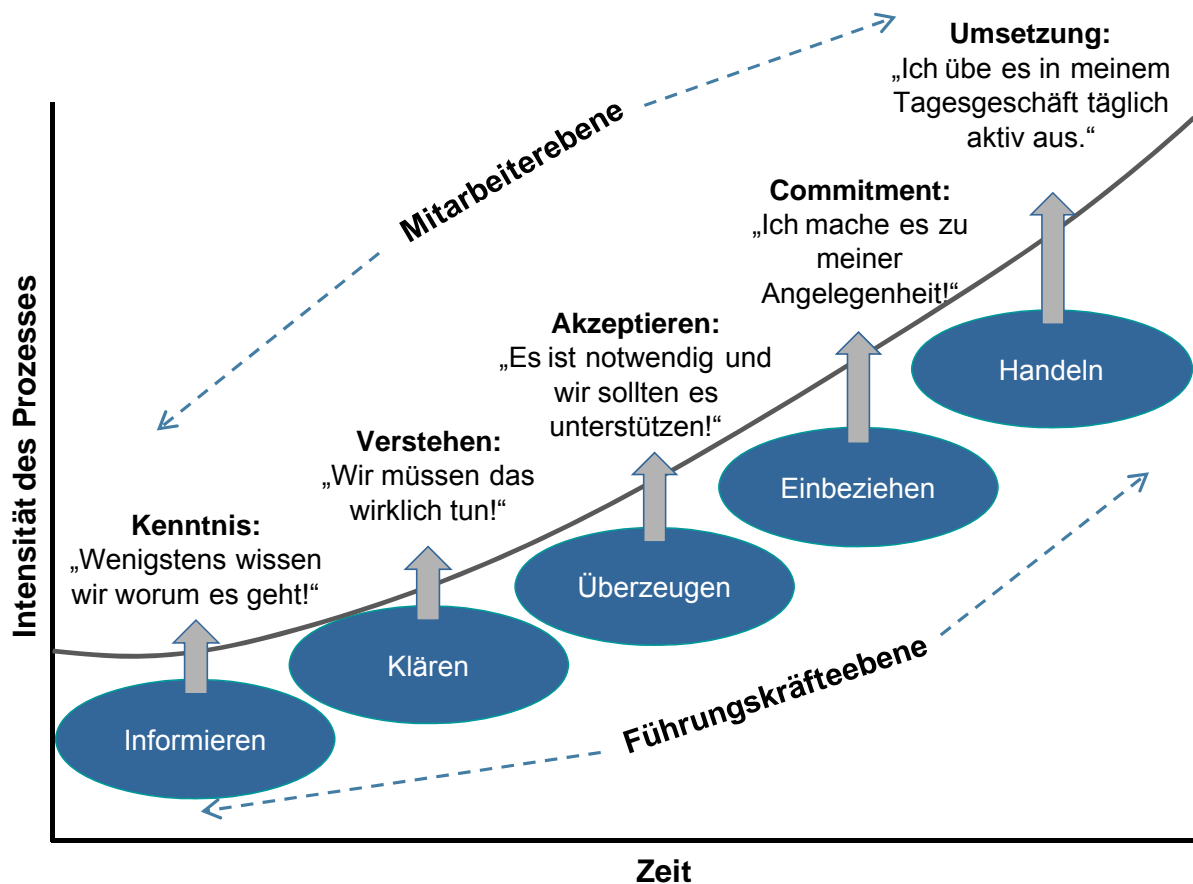


Abbildung 14: Veränderungsmanagement (in Anlehnung an [Ran08])

Von zentraler Bedeutung beim Change-Management im Rahmen des vorliegenden Projektes war eine vorausschauende Planung der Veränderungen und eine umfangreiche Kommunikation mit den betroffenen Mitarbeitern. Wichtig war es, die Mitarbeiter laufend über geplante Schritte, die Gründe und die Ziele der geplanten Maßnahmen zu informieren und für Akzeptanz zu werben. Hierbei ging es auch darum, dass die Führungskräfte Fragen der Mitarbeiter beantworteten, eine klare Orientierung gaben und für Vorschläge seitens der Mitarbeiter offen waren. Dadurch ließ sich Verständnis für die Veränderung schaffen und auch die Bereitschaft der Mitarbeiter erhöhen, sich für die Maßnahmen einzusetzen.

Im weiteren Projektverlauf wurden Informationen zum Fortschritt der neuen Maßnahmen kontinuierlich kommuniziert, um die Einsatzbereitschaft und den Umsetzungswillen der Mitarbeiter zu fördern. Letztendlich waren die Arbeitnehmer eher bereit, Neuerungen zu akzeptieren, sie zu gestalten und den neuen Weg mitzugehen, wenn sie eingebunden wurden.



Abbildung 15: Installation der Implementierungen

Beim Kooperationspartner Sebald Schleifscheiben wurde der Energiebedarf des gesamten Werkes in einem dynamischen Graphen visualisiert (in Abbildung 15 links). Dieser Graph zeigt zu jederzeit den Gesamtverlauf des Lastgangs der Interventionsphase an. Der höchste Wert wurde durch eine Linie hervorgehoben. Zusätzlich wurde eine ampelähnliche Anzeige visualisiert, die neben der aktuellen Last den Übergang in den kritischen Bereich verdeutlicht. Der kritische Bereich wurde als Annäherung des aktuellen Lastgangs auf 90 % der gemessenen Lastspitze definiert. So hatte der Mitarbeiter die Möglichkeit, frühzeitig zu reagieren, um Maschinen auszuschalten oder das Einschalten neuer Maschinen zu verhindern. Erreichte der Energiebedarf den kritischen Bereich, wurde der Schriftzug „Keine weiteren Öfen einschalten“ angezeigt. Um einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess zu initiieren, wurde der kritische Wert variabel gestaltet. Dieser konnten von der Produktionsleitung durch eine Softwareanbindung an das Managementsystem des Unternehmens an die unterschiedlichen Belastungsphasen des Unternehmens angepasst werden.



Abbildung 16: Visualisierung Energiebedarf - Sebald

Ziel der Visualisierung des Materialverbrauchs war es, den aktuellen Materialeinsatz gegenüber einem optimalen Referenzwert darzustellen. Diese Visualisierung erfolgte auf zwei getrennten Monitoren. Zum einen in der Produktionshalle auf einem TFT-Monitor und zum anderen als PC-Anwendung bei der Arbeitsvorbereitung. Durch die Vernetzung einer Präzisionswaage und einem Lasermesssensor war die Arbeitsvorbereitung durch die Visualisierung (Abbildung 17) auf dem PC mit Beginn der Interventionsphase in der Lage die Ausgangsmenge der Abrasionsmischung (Pressgewicht) und die Ziel-Presshöhe mit dem Gewicht und der aktuellen Presshöhe nach der Nacharbeit zu vergleichen. Dazu mussten die Ausgangswerte manuell in die Software eingegeben werden. Die Erfassung des Pressgewichts und der Presshöhe erfolgte mit Hilfe der verwendeten Messtechnik automatisiert. So konnte gezielt die Ausgangsmenge der Abrasionsmischung dem eigentlichen Bedarf angepasst werden. Eine detaillierte grafische Auswertung ermöglichte zudem eine Langzeitanalyse der verschiedenen Produkte.

Die Auswertung des Vergleichs wurde auf einem TFT-Monitor in der Produktionshalle visualisiert (Abbildung 18). Dazu wurde ein Schleifscheibenmodell dargestellt, auf dem der Soll-Ist-Vergleich der einzelnen Produkte angezeigt wurde. Überschritt der Materialeinsatz der Abrasionsmischung den optimalen Sollwert um 15 % wurde der Schriftzug „Materialeinsatz senken“ angezeigt. Die Ergebnisse der Langzeitanalysen wurde in den beiden Feldern *Ersparnis pro Produkt* und *Ersparnis insgesamt* visualisiert. Diese Rückmeldung des Systems motivierte die Mitarbeiter, weiter an der Senkung des Materialeinsatzes zu arbeiten.

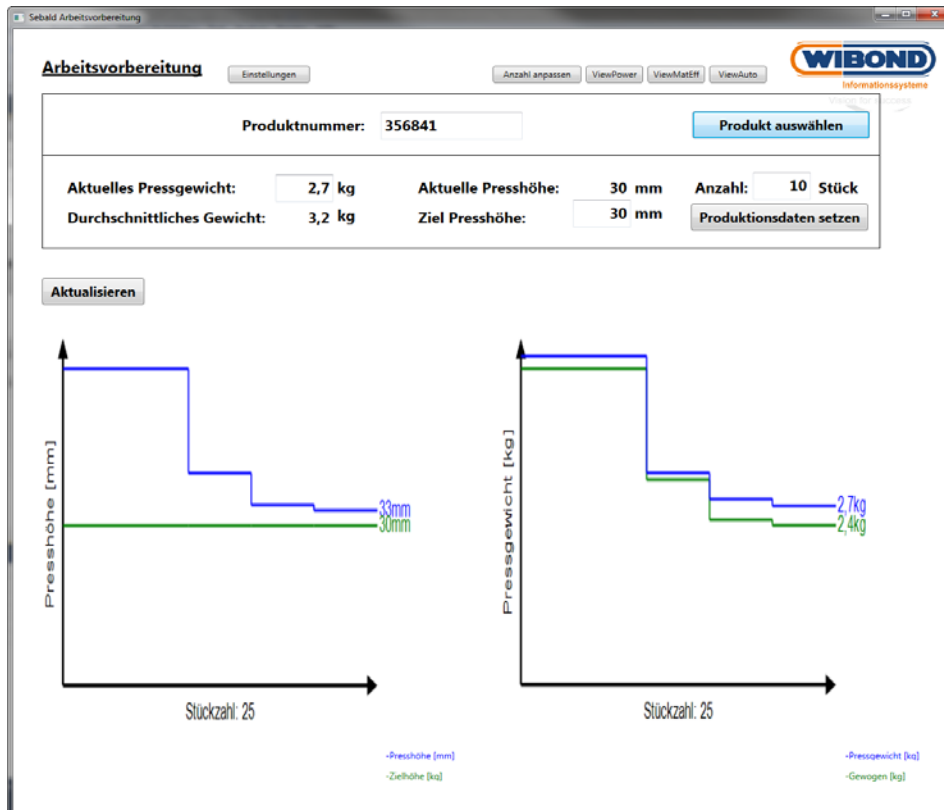


Abbildung 17: Visualisierung Materialeinsatz - Sebald

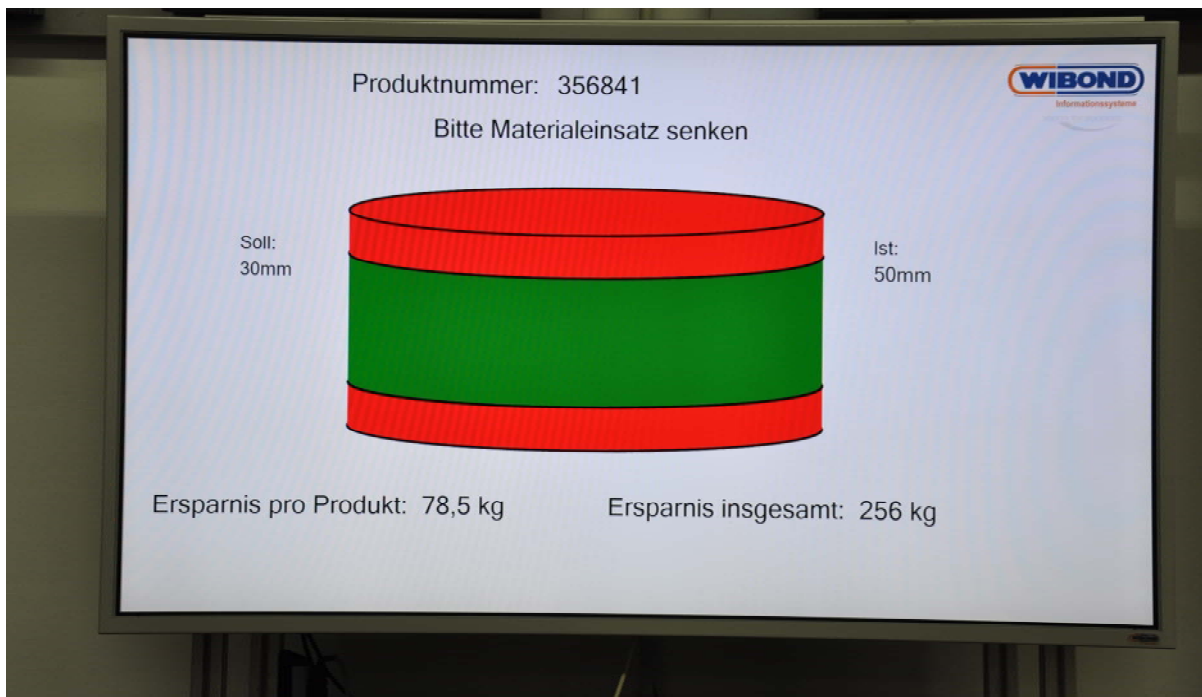


Abbildung 18: Visualisierung in der Produktionshalle - Sebald

Beim Kooperationspartner Lauterbach-Kießling wurden zwei Anwendungen implementiert. Zum einen eine Visualisierung des Leistungsbedarfs für die Hallenbeleuchtung und zum anderen die Füllmenge des Betontrichters.

Die Visualisierung des Leistungsbedarfs ist in Abbildung 19 ersichtlich. Diese zeigt den Bedarf (in Abbildung 19 dargestellt als Verbrauch, kurz: „Verbr.“) zum besseren Verständnis in der Einheit €/h sowie in Form eines grünen Balkens. Eine Ersparnis dieser Intervention errechnete sich aus der Differenz eines gemessenen Ist-Zustandes (bisheriges Verhalten der Mitarbeiter im Umgang mit der Beleuchtung) und dem aktuellen Verbrauch. 60 % dieser Ersparnis floss direkt in das Betriebsergebnis von Lauterbach-Kießling. 40 % der Ersparnis erhielt der Mitarbeiter in Form einer sogenannten Gratifikation (im vorliegenden Fall in Form eines Frühstücks). Dieser Betrag, der am Ende der Interventionsphase den Mitarbeitern zur Verfügung stehen sollte, wurde ebenfalls in Echtzeit visualisiert (in Abbildung 19 dargestellt als „Ersparnis“). Die Mitarbeiter wurden somit direkt motiviert, die Hallenbeleuchtung in Bereichen, in denen nicht gearbeitet wurde, auszuschalten. Es war zudem zu beobachten, dass einzelne Mitarbeiter andere Mitarbeiter darauf hinwiesen, die Beleuchtung auszuschalten.



Abbildung 19: Visualisierung Energiebedarf - Lauterbach-Kießling

Der installierte LED-Monitor bei Lauterbach-Kießling zeigte 2 Stunden vor Schichtende die Restmenge Beton im Trichter wechselnd zum Stromverbrauch an. Abbildung 20 zeigt das gewechselte Bild des identischen LED-Monitors. Neben der gesteigerten Prozesstransparenz durch die Visualisierung der Restmenge wurde zudem noch der Fließtext „Ist das Ihr letztes Produkt?“ eingeblendet. Dieser sollte für eine erhöhte Sensibilisierung bei den Mitarbeitern sorgen, bis zum Ende der Schicht nur noch die bis dahin benötigte Menge Beton im Trichter zu haben.



Abbildung 20: Visualisierung Materialeinsatz - Lauterbach-Kießling

Die zur Berechnung der Füllmenge des Betontrichters herangezogene Formel ist dem Anhang zu entnehmen. Bei der Visualisierung beim Kooperationspartner Klubert + Schmidt wurde der Fokus auf die Schaffung von Transparenz gelegt (Abbildung 21). Den Mitarbeiter ist häufig nicht bewusst, was der Einsatz von Druckluft kostet. Um den Mitarbeitern ein besseres Verständnis für die Kosten zu vermitteln, wurden neben dem Druckluftverbrauch in Litern auch die Kosten visualisiert. Zusätzlich wurden die Tagesverbräuche in Litern mithilfe eines Graphen visualisiert, um dem Mitarbeiter eine Orientierung über den Druckluftverbrauch zu liefern. Diese Intervention erzielt einen großen Mehrwert, wenn ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Schichten oder gruppenweise visualisiert wird.

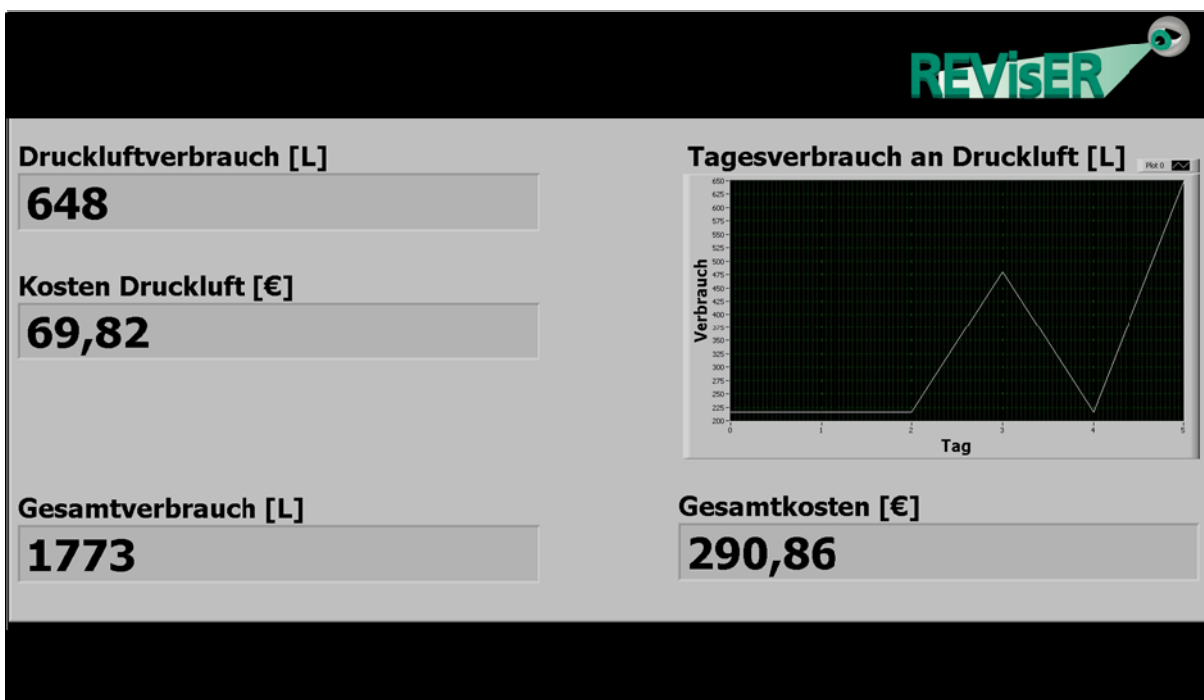


Abbildung 21: Visualisierung Druckluftverbrauch - Klubert + Schmidt

Wie der Beschreibung der vorherigen AP zu entnehmen ist, wurde bei der Federnfabrik Dietz der Materialverbrauch im Rüstprozess erfasst und visualisiert. Dabei wurden bei drei

Produkten L1, L2, L3 der aktuelle Materialverbrauch, der durchschnittliche Materialverbrauch sowie eine Tendenz zu vorherigen Prozessen visualisiert (Abbildung 22). Durch die Visualisierung mit den aus dem Straßenverkehr bekannten Ampelfarben konnte der Mitarbeiter seine aktuelle Leistung mit vorherigen Leistungen vergleichen.

Um eine Demotivation der Mitarbeiter zu verhindern, wurde bewusst darauf verzichtet, den Materialverbrauch im Rüstbetrieb zu personalisieren. Eine Personalisierung der Materialverbräuche hätte sich motivierend auf die Mitarbeiter mit überdurchschnittlichem Leistungsvermögen ausgewirkt. Mitarbeiter mit durchschnittlichem oder unterdurchschnittlichem Leistungsvermögen hätten bei einer Personalisierung des Materialverbrauchs dagegen schnell resigniert.

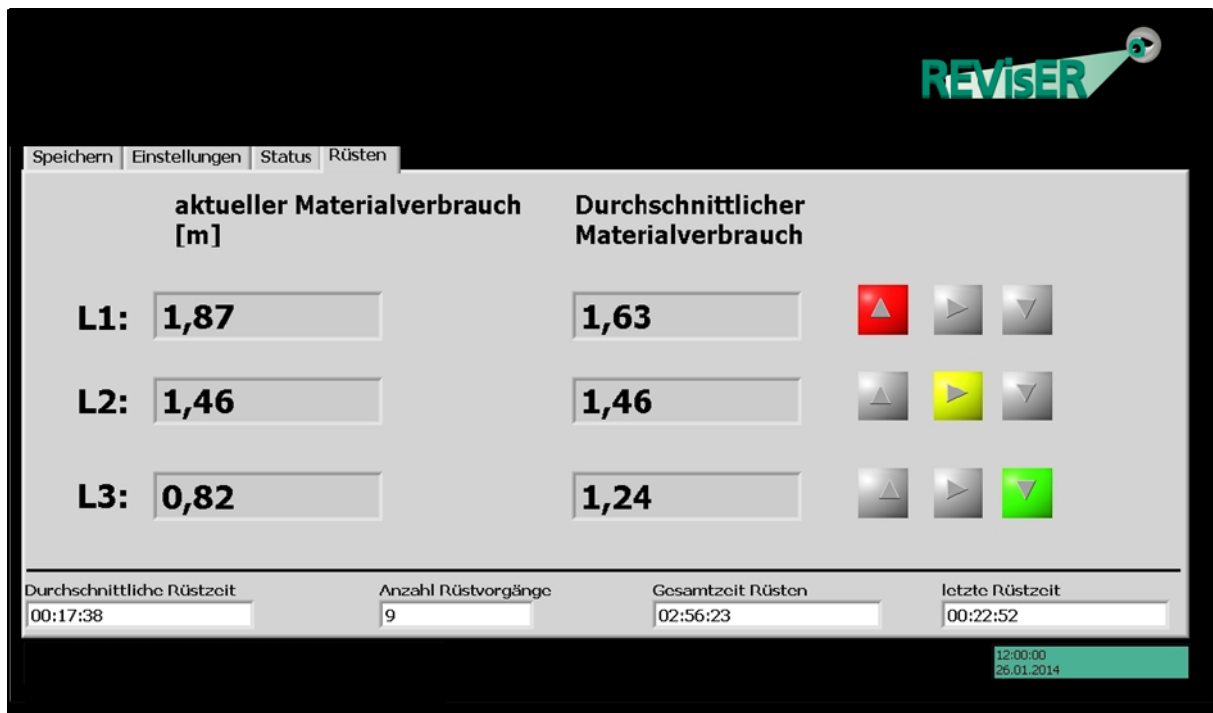


Abbildung 22: Visualisierung Rüstvorgänge - Federnfabrik Dietz

AP 8: Dokumentierung der Einsparungen sowie Evaluierung der Wirkung unterschiedlicher Arten an Visualisierungen und Anreizen auf die Mitarbeitermotivation

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Dokumentation der erzielten Verbesserung der Ressourceneffizienz im Vergleich zum Status-Quo.

Beim Kooperationspartner Sebald Schleifscheiben wurde zunächst die Visualisierung des Materialverbrauchs für 4 Wochen aufgebaut und anschließend abgeschaltet. Ein Vergleich zwischen dem visualisierten und dem nicht visualisierten Prozess weist einen Anstieg der Spitzenlast um 19 % aus (Abbildung 23). Dieser Sprung von 177 kW auf 211 kW entspricht bei einem Bereitstellungspreis von derzeit 58 € pro kW eine finanzielle Mehrbelastung um

1.972 €. Der Interventionszeitraum war im Frühjahr 2014, der, verglichen zu anderen Zeiträumen, tendenziell geringere Lastspitzen aufweist. Es ist daher davon auszugehen, dass mit der entwickelten Intervention eine Senkung der Spitzenlast um bis zu 25 % möglich ist. Dies entspricht einer Einsparung von 3.700 € pro Jahr.

Anstieg der Spitzenlast ohne Visualisierungstechnik um 19%

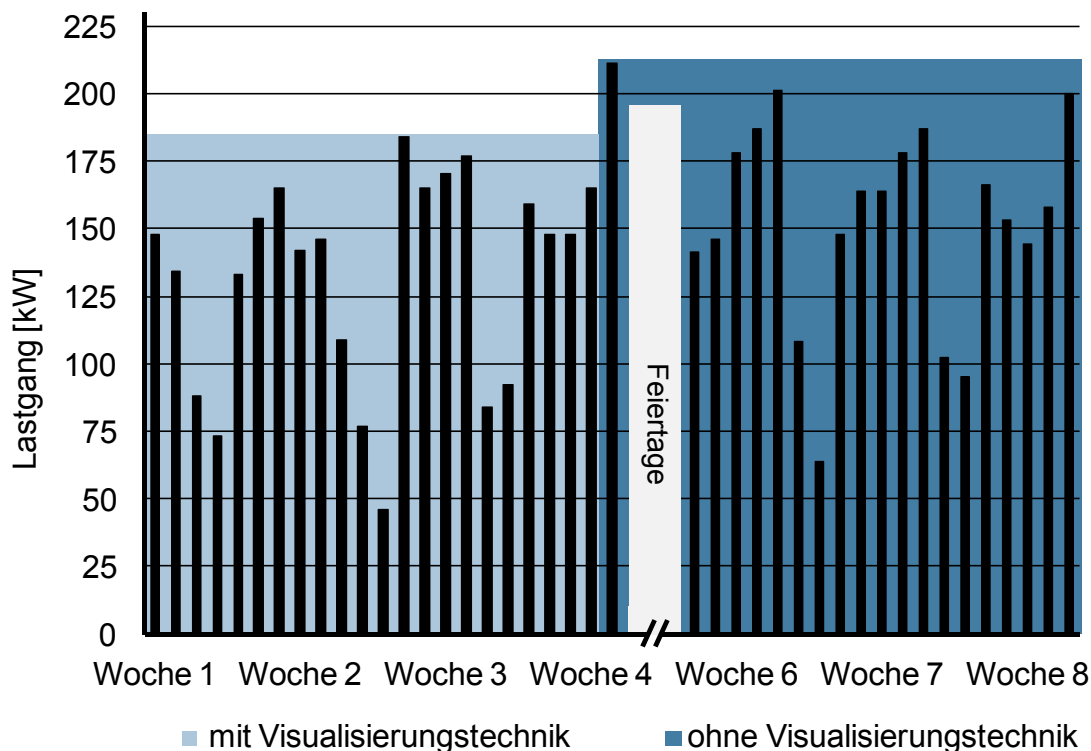


Abbildung 23: Auswertung Energiebedarf - Sebald

Materialeinsparung bei 44% der Produkte

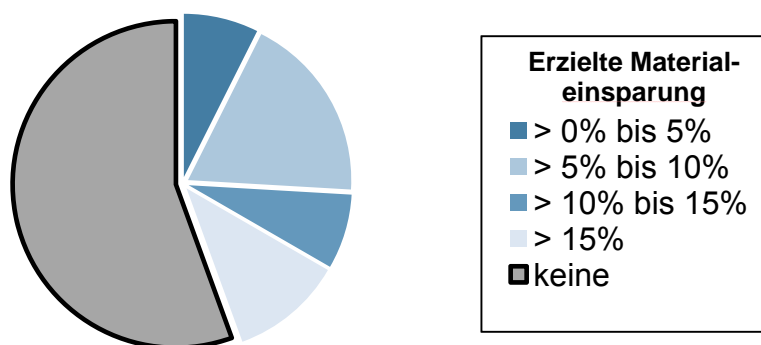


Abbildung 24: Auswertung Materialeinsatz I - Sebald

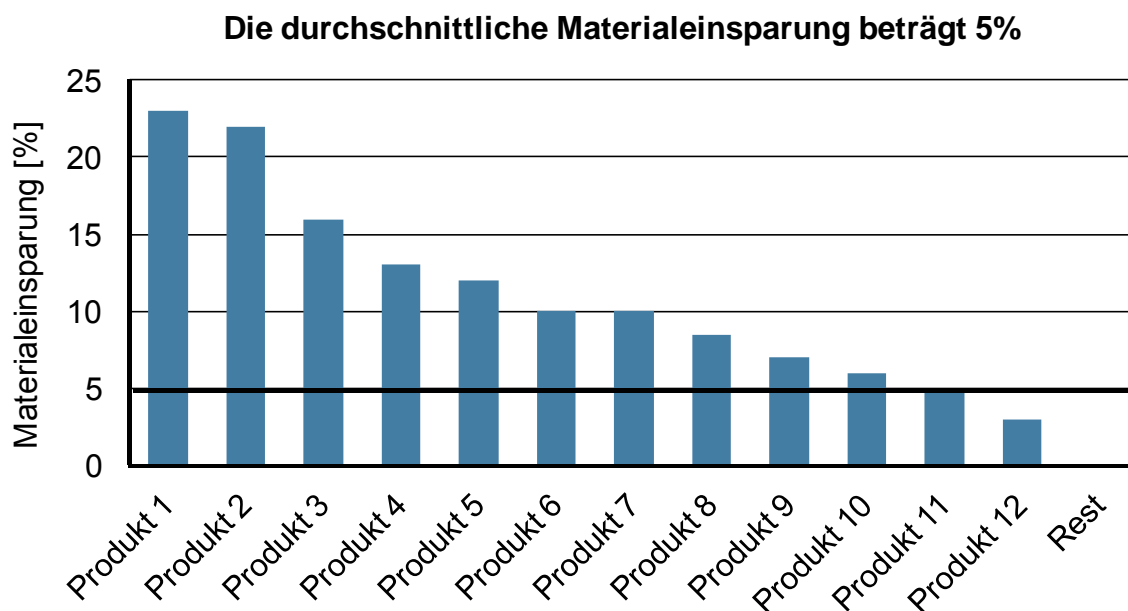


Abbildung 25: Auswertung Materialeinsatz II - Sebald

Wie Abbildung 24 zu entnehmen ist, konnten bei 44 % der betrachteten Produkte eine Materialeinsparung herbeigeführt werden. Dadurch ergibt sich, wie Abbildung 25 zu entnehmen ist, eine Materialeinsparung von 5 % über alle betrachteten Produkte hinweg. Da seitens des Kooperationspartners Sebald Schleifscheiben im Interventionszeitraum ein repräsentativer Portfolioquerschnitt mit der Messtechnik untersucht wurde, lässt sich der Wert von 5 % auf eine dauerhafte Implementierung übertragen. Bezogen auf die betrachteten Verschwendungsursachen entspricht das einer jährlichen Materialeinsparung von 2,15 t Abrasionsmischung bzw. 10.800 €. Hinzu kommen ca. 3.000 € Ersparnis durch einen verminderten Werkzeugverschleiß. Die mögliche Gesamtersparnis der Intervention bei Sebald Schleifscheiben entspricht damit 13.800 € und übertrifft damit die im Forschungsantrag angestrebte Ersparnis.

Die erzielten Reduktionen im Stromverbrauch beim Kooperationspartner Lauterbach-Kießling sind Tabelle 17 zu entnehmen. In dieser ist neben einer eindeutig abnehmenden Tendenz beim Stromverbrauch auch eine Reduzierung auf 24 % des ursprünglichen Stromverbrauchs in der Woche 5 auszumachen.

Die energetischen Detailauswertungen bei Lauterbach-Kießling zeigen, dass in der Interventionsphase 981 kWh bzw. 206 € eingespart werden konnten. Die Intervention fand im Herbst statt, wenn witterungsbedingt mehr Licht als im Frühjahr und Sommer benötigt wird. Bei einer angenommenen, gleichbleibenden prozentualen Einsparung von 75 % der bisher benötigten Energie für die Hallenbeleuchtung, würde dies zu einer Ersparnis von 11.200 kWh bzw. 2.360 € pro Jahr führen. Die erarbeitete Intervention ist auch auf die zweite Produktionshalle von Lauterbach-Kießling übertragbar. Dadurch ergibt sich eine mögliche Gesamtersparnis von 24.200 kWh bzw. 5.100 € pro Jahr.

Tabelle 17: Detailauswertung - Lauterbach-Kießling

Woche	Ersparnis [%]	Ersparnis [€]	Ersparnis [kwh]
Woche 1	33	18	87
Woche 2	45	37	176
Woche 3	36	30	141
Woche 4	72	59	281
Woche 5	76	62	296
Gesamt	52	206	981

Die Visualisierung der Füllmenge des Betontrichters führte zu einer Einsparung des Gesamtmaterialeinsatzes um 0,5 %, was einem monetären Wert von ca. 490 Euro im Jahr entspricht.

Die mögliche Gesamtersparnis der Intervention bei Lauterbach-Kießling entspricht somit 5590 € und ist damit fast doppelt so hoch, wie das im Forschungsantrag angestrebte Ersparnis.

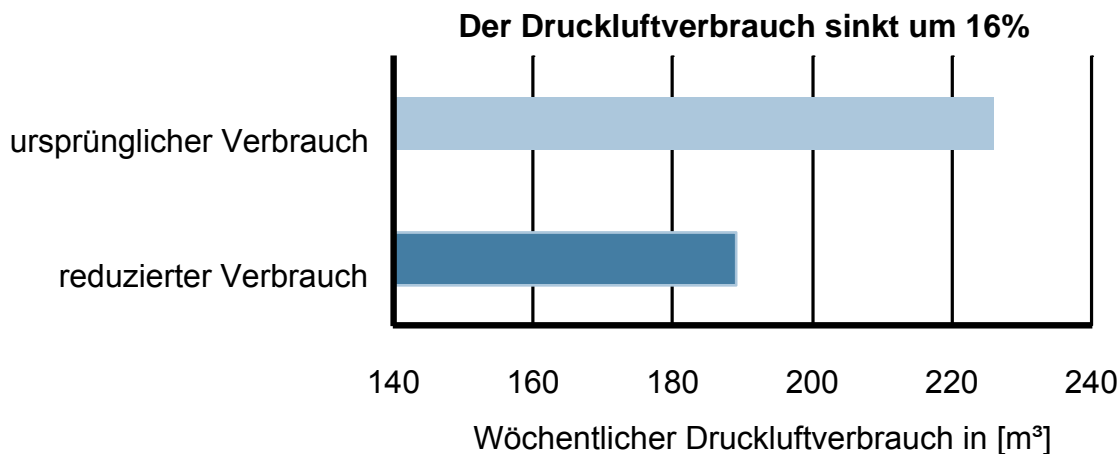


Abbildung 26: Auswertung Druckluftverbrauch - Klubert + Schmidt

Die Auswertung des Unternehmens Klubert + Schmidt zeigt, dass durch die Intervention der Visualisierungstechnik des wöchentlichen Druckluftverbrauchs von 226 m³ auf 189 m³ reduziert werden konnte. Dies entspricht einer Ersparnis bei 2,5 Ct pro m³ von 0,92 € pro Woche und 48,1 € pro Jahr. Durch eine dauerhafte Implementierung würde der druckluftbedingte Stromverbrauch von 2.112 kWh auf 1.769 kWh gesenkt werden.

Bei der Intervention bei der Federnfabrik Dietz konnte durch die eingebaute Mess- und Visualisierungstechnik eine Reduzierung des Materialverbrauchs im Rüstbetrieb um 30 % erzielt werden.

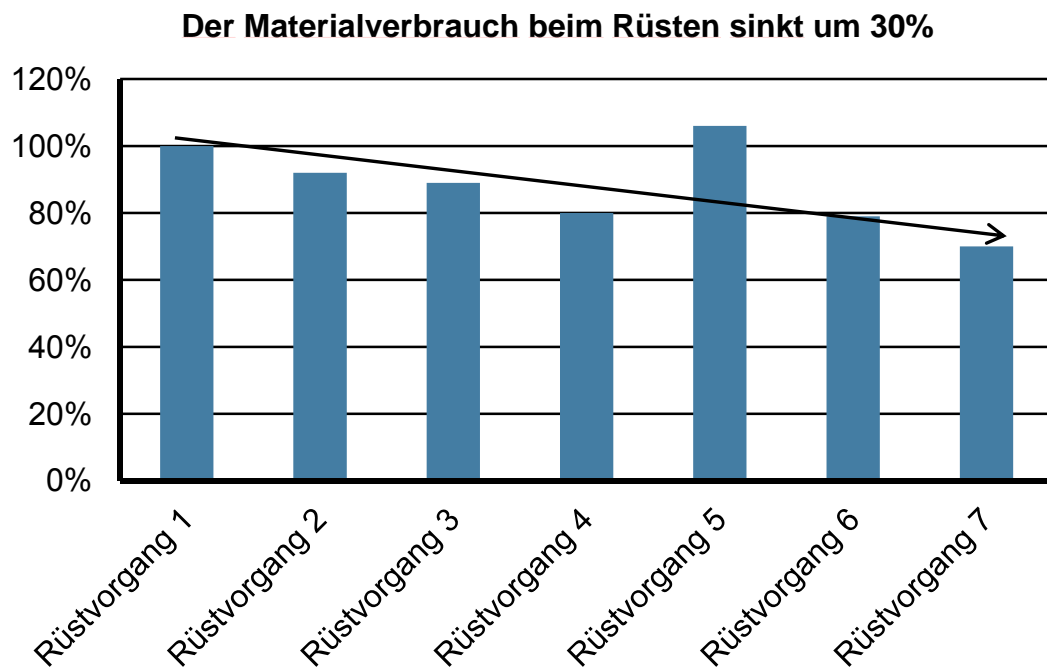


Abbildung 27: Auswertung Materialeinsatz - Federnfabrik Dietz

Da es sich bei dem betrachteten Stanz-Biege-Automaten um ein materialintensives Modell gehandelt hat, ist der Wert von 30 % nicht auf den Gesamtmaterialverbrauch übertragbar. Nach Einschätzungen von Prozessexperten ist mithilfe der Visualisierungen eine Materialersparnis von 15 % bezogen auf das gesamte Produktportfolio möglich. Das entspricht, bezogen auf die betrachteten Verschwendungen, einer Ersparnis von 9,6 t bzw. 38.100 € für alle acht im Unternehmen vorhandenen Stanz-Biege-Automaten.



Abbildung 28: Prozessexperten an der Visualisierung

Tabelle 18: Evaluierung der Visualisierung und der Anreize

Unternehmen	Lauterbach-Kießling	Federnfabrik Dietz	Sebald Schleifscheiben	Klubert + Schmidt	Sebald Schleifscheiben	Lauterbach-Kießling
Zielgröße	Stromverbrauch der Beleuchtung	Materialverbrauch im Rüstbetrieb	Glättung von Lastspitzen	Druckluftverbrauch	Reduzierung des Ausgangsgewichts	Restmenge im Trichter
Ressourcenersparnis	75%	30%	19%	16%	5%	1%
Partizipation an der Ersparnis	40% der Ersparnis	nein	nein	nein	nein	nein
Komparatives Echtzeitfeedback	Komparation mit Ursprungsverbrauch	Komparation mit vergangener Leistungen	Komparation mit vergangener Leistungen	Komparation mit eigener Leistung	Komparation mit Optimalzustand	nein
Sensibilisierung	Ersparnis in Echtzeit	Ampelfunktion	Ampelfunktion	Kosten in Echtzeit	Laufschrift, Grafik	nein
Transparenz	Verbrauch in Echtzeit	Verbrauch in Echtzeit	Verbrauch in Echtzeit	Verbrauch in Echtzeit	Vergangener Verbrauch	Restmenge im Trichter
Informationsmenge	gering - mittel	hoch	hoch	hoch	hoch	gering - mittel
Interaktion mit dem Benutzer	gering - mittel	sehr hoch	hoch	sehr hoch	hoch	gering - mittel

Grundlage aller Anreizmöglichkeiten ist die Schaffung von Transparenz und eine stetige Sensibilisierung hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs sowie das Wissen der Prozessbeteiligten auf die eigene Einflussmöglichkeit. Die Evaluierung (Tabelle 18) der einzelnen Anreizmöglichkeiten zeigt, dass mit einer Mitarbeiterbeteiligung an der erzielten Ersparnis der höchste Effekt erzielt werden kann. Der reine Vergleich zu einem Zielwert hingegen zeigt die niedrigste Verbesserung. Die Evaluierung zeigt zudem, dass die Höhe der Einsparung unabhängig von der eingesetzten Visualisierungstechnik ist.

Die Anzahl der im Projektantrag vorgegebenen Interventionen wurde übertroffen. Anstatt wie vorgegeben fünf Interventionen zu realisieren, wurden von den Wissenschaftlern des Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik und des Forschungsinstituts Betriebliche Bildung sechs Interventionen implementiert. Die im Projektantrag angestrebte Einsparzielgröße von 58.000 € pro Jahr bei allen Kooperationspartnern konnte mit 61.000 € übertroffen werden. Unerwartete Probleme sind bei der Bearbeitung der AP 7 und AP 8 nicht aufgetreten. Es ist gelungen, die Implementierung der Mess- und Visualisierungstechnik gemäß dem Antrag durchzuführen. Auch die Dokumentation der Einsparungen sowie die

Evaluierung der unterschiedlichen Arten an Visualisierungen und Anreizen auf die Mitarbeitermotivation wurde gemäß Antrag erarbeitet.

3.1.4 Weiterverarbeitung des erworbenen Wissens

Im folgenden Unterabschnitt wird die Weiterverarbeitung des erworbenen Wissens beschrieben. Dafür werden:

- in AP 9 ein Modell für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zur Anschaffung von Visualisierungstechnik,
- sowie in AP 10 die Zusammenfassung der Ergebnisse und der Felderprobung zu einem Maßnahmengerrüst bestehend aus Leitfaden und PC-Anwendungen und einem Demonstrator dargestellt.

AP 9: Aufstellen eines Modells für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Für das Aufstellen eines Modells für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wurde in einem Workshop zunächst der geleistete Aufwand an Arbeitszeit und Ausrüstung, der für die Detailplanung und die Implementierung der Intervention aufgebracht wurde, ermittelt und rechnerisch um einen angenommenen Lerneffekte Seitens des Projektteams bereinigt (Tabelle 19). Diesem Aufwand wurden die in AP 8 ausgewiesenen Einsparungen gegenübergestellt. Anschließend wurde eine statische Amortisationszeit ausgewiesen. Die Berechnung dieser Amortisationszeit ergibt sich zu:

$$\text{Amortisationszeit} = (\text{Ersparnis} - \text{Betriebskosten}) / \text{Kapitaleinsatz}$$



Abbildung 29: Gemeinsamer Workshop bei einem Kooperationspartner

Tabelle 19: Amortisationen der Interventionen

		Lauterbach-Kießling		Federnfabrik Dietz	Sebald Schleifscheiben		Klubert + Schmidt
		Material	Energie	Material	Material	Energie	Energie
1. Kapitaleinsatz		7.106	8.675	8.840	14.960	13.700	8.820
1.1 Visualisierungstechnik		2.700	2.700	800	5.900	5.900	800
Monitor	€	2.400	2.400	400	3.700	3.700	400
Software	€	300	300	400	2.200	2.200	400
1.2 Messtechnik		1.406	575	840	1.860	600	2.020
Sensor	€	1.316	530	800	1.800	530	2.000
Kabel	€	90	45	40	60	70	20
1.3 Mitarbeiter		3.000	5.400	7.200	7.200	7.200	6.000
Entwicklung	€	1.200	2.400	4.800	4.800	3.600	3.600
Beschaffung	€	600	600	600	600	600	600
Implementierung	€	1.200	2.400	1.200	1.200	2.400	1.200
Wartung	€	0	0	600	600	600	600
4. Gewinn	€/Jahr	374	5.045	4.672	13.680	3.640	31
Ersparnis	€/Jahr	409	5.100	4.762	13.800	3.700	46
Betriebskosten	€/Jahr	35	55	90	120	60	15
6. Amortisationszeit	Jahre	19,00	1,72	1,89	1,09	3,76	284,52

Ergebnis dieses Arbeitspakets ist ein einfach zu handhabendes Berechnungsmodell (Tabelle 20), in dem der monetäre Aufwand für die Implementierung unterschiedlicher Mess- und Visualisierungstechniken hinterlegt ist.

Eine Verallgemeinerung der Ersparnisse ist aufgrund der Vielzahl der möglichen Mess- und Visualisierungstechniken sowie der unterschiedlichen Anreizsysteme nicht möglich. Die im Projekt REVisER realisierten Interventionen können aber als sogenannte Best-Practice-Beispiele herangezogen werden.

Tabelle 20: Berechnungsmodell Visualisierungstechnik

Visualisierungstechnik	LED	TFT	Tablet-PC
Monitor	2.400 €	3.700 €	400 €
Software	300 €	2.200 €	400 €
Wartung	0 €	600 €	600 €
Messtechnik	Druckluft	Material	Energie
Sensor	Min. 2000 €	nach Anwendungsfall	530 €
Beschaffung	600 €	600 €	600 €
Implementierung	1.200 €	1.200 €	2.400 €
Entwicklung		Material	Energie
	niedriger Informationsgehalt	1.200 €	2.400 €
	hoher Informationsgehalt	4.800 €	3.600 €

AP 10: Zusammenfassen der Ergebnisse der Felderprobung zu einem Maßnahmengерüst

Zum Abschluss des Projekts wurde der Wissenstransfer zur Anwendung der erarbeiteten Systematik in weiteren Unternehmen durch eine umfangreiche Aufbereitung der Projektergebnisse sichergestellt. Durch diese Systematik werden weitere Unternehmen in die Lage versetzt, Material- und Energieeinsparungen durch die in REVisER erprobten Maßnahmen erfolgreich und aufwandsarm zu erreichen. Diese Systematik wird interessierten Unternehmen in Form eines Leitfadens und einer Software zur Verfügung gestellt. In der Lernfabrik des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik an der Universität Bayreuth wurde zudem ein Demonstrator aufgebaut, um die Projektergebnisse in die Lehre und Weiterbildung einfließen zu lassen. Weiterhin wurden die in REVisER erprobten Maßnahmen in die Lehre sowie in die Industrieberatung übernommen.

Besonders hohe Wirkungen erzeugen die ausgesuchten Maßnahmen bei der direkten Beteiligung der Mitarbeiter an den Ressourcenersparnissen. Weiterhin lässt sich festhalten, dass sowohl Prozesstransparenz als auch eine stetige Sensibilisierung gegeben sein müssen. Das Beispiel der Materialeffizienzoptimierung bei Lauterbach-Kießling zeigt eindeutig, dass bloße Prozesstransparenz nicht genügt, wohl aber die Basis für Optimierungen bildet.

Nach Tabelle 18 korrelieren die dargestellte Informationsmenge und die Interaktion mit dem Benutzer nicht mit den eingesparten Ressourcen. Auch auf einen Zusammenhang zwischen den Darstellungsformen und dem Ressourcenverbrauch lässt sich nicht schließen.

Im Bereich der Messtechnik zur Erfassung des Energiebedarfs gibt es nach dem Stand der Technik ausgereifte Systeme, die aufwandsarm implementiert werden können. Im Forschungsprojekt hat sich die Kombination aus Stromwandler, Leistungsmessklemme und Recheneinheit als eine für viele Anwendungsfälle geeignete Kombination herausgestellt. Auch eine darauf aufbauende Softwareentwicklung ist gut realisierbar.

Im Bereich der Messtechnik zur Erfassung der Materialverbräuche existieren lediglich speziell für den Anwendungsfall entwickelte Insellösungen, die aufwendig angepasst und implementiert werden müssen. Sensoren die für eine Vielzahl von Anwendungsfällen genutzt werden können sind auf dem Markt nicht verfügbar. Aufgrund der Kosten, die produzierende Unternehmen für das im Fertigungsprozess zu verarbeitende Material aufwenden müssen, ist eine Optimierung ökonomisch und ökologisch sehr gewinnbringend. Durch staatliche Förderprogramme wie „go-effizienz“ der deutschen Materialeffizienzagentur kann der Eigenanteil der Investition für eine Optimierung der Materialeffizienz noch weiter gesenkt werden.

Im Bereich der Druckluftoptimierung wurde die Visualisierung an einem einzelnen Arbeitsplatzes, wie im Anwendungsfall beim Kooperationspartner Klubert + Schmidt realisiert. Aufgrund der niedrigen Ersparnis ist dies nicht zielführend. Hier könnte eine Visualisierung des Druckluftverbrauchs eines größeren Bereiches, z.B. einer Maschinengruppe oder einer Abteilung, den Einsatz der teuren Messtechnik rechtfertigen. Die Intervention bei der Federnfabrik Dietz zeigt, dass mit der dort angewandten Visualisierung ein Wissenstransfer ausgelöst werden kann. Die Weiterentwicklung der Messtechnik zur Erfassung des Materialverbrauchs an Stanz-Biegeautomaten ist vielversprechend, da diese sich auch auf andere Stanz-Biege-Automaten übertragen lässt. Die Messtechnik zur Erfassung des Materialverbrauchs bei Sebold Schleifscheiben ist eine Insellösung, da diese sehr individuell entwickelt werden musste. Die Intervention zur Optimierung des Energiebedarfs zeigt sehr gute Ergebnisse. Gerade mit den individuell einstellbaren kritischen Bereichen lässt sich durch diese Intervention ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess anstoßen, der auch als Maßnahme im Sinne der DIN EN ISO 50001 zertifiziert werden kann. Diese Zertifizierung hat eine Rückerstattung der Stromsteuer zur Folge und würde die hohen Investitionskosten der Intervention zusätzlich rechtfertigen.

Wie in AP 2 beschrieben, wurden im Rahmen des Forschungsprojektes REVisER die Materialverschwendungen von weiteren acht Unternehmen analysiert, bei denen der Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik bereits Aufnahmen durchgeführt hatte. Eine Untersuchung von 208 Potenzialen zeigt, dass neben dem Fertigungsmitarbeiter auch die Fertigungsorganisation einen erheblichen Einfluss auf die Materialverschwendungen in einem Unternehmen hat. Demnach existiert auch in diesem Bereich Forschungsbedarf.

Fertigungsorganisation ist eine der Hauptursachen für Materialverschwendungen

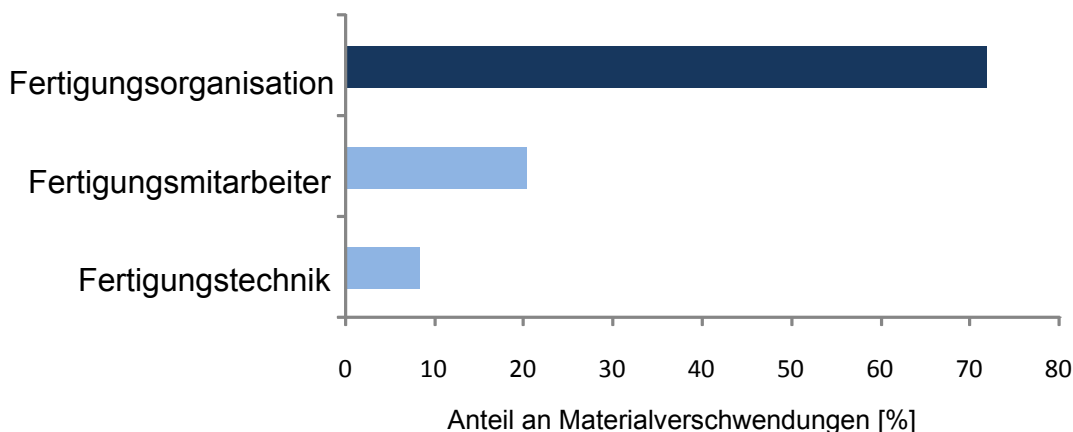


Abbildung 30: Hauptursachen der Materialverschwendungen

Das Forschungsprojekt REVisER leistet durch seine entwickelte Systematik neben Kosteneinsparungen auch einen signifikanten Beitrag zur Umweltentlastung. Tabelle 21 zeigt eine Übersicht der im Projekt eingesparten Menge an Material und Energie. Zunächst sollen diese Einspareffekte mit anschaulichen, alltäglichen Situationen verglichen werden.

Tabelle 21: Eingesparten Menge an Material und Energie (pro Jahr)

Unternehmen	Materialart	Materialeinsparung [t] pro Jahr	Energieeinsparung [kWh] pro Jahr
Sebald Schleifscheiben	Phenolharz	1,075	keine Angaben
	Feldspat	1,075	
Lauterbach-Kießling	Beton	20,000	11.200
Klubert + Schmidt	keine Angaben		343
Federnfabrik Dietz	Metallkupferdraht	3,200	keine Angaben
	Edelstahl (1.4310/1.4320)	6,400	
Summen		31,750	11.543

Die Summe des Eingesparten Materials von 31,75 t, entspricht dem Gesamtgewicht von mehr als 26 VW Golf⁶. Bezogen auf die eingesparte Energie von 11.534 kWh bietet sich der Vergleich mit einem 4-Personendurchschnittshaushalt an, der mit der eingesparten Energie 2,3 Jahre auskommen würde⁷. Würde man die eingesparte Energie auf eine äquivalente Fahrleistung eines Kfz umrechnen, dann entspräche dies einer Strecke von 25.746 km. Das entspricht in etwa der 25-fachen Strecke zwischen Flensburg und Garmisch-Partenkirchen⁸.

⁶ Gewicht eines VW Golf, BlueMotion TSI, (85 PS): 1,2 t, http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/dialog/pdf/golf-a7/preisliste/_jcr_content/renditions/rendition.download_attachment.file/golf_preisliste.pdf, aufgerufen: 01.08.2014

⁷ Stromverbrauch eines 4-Personendurchschnittshaushalt : 5009 kWh, Quelle:<http://www.musterhaushalt.de/durchschnitt/stromverbrauch/>, aufgerufen am 01.08.2014

⁸ Heizwert Benzin: 12,2 kWh/kg; Dichte von Benzin 0,75 kg/l; durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch VW Golf, BlueMotion TSI, (85 PS): 4,9 l/100km (Innerorts/Außerorts-kombiniert)

Abschließend wurden die eingesparten Material- und Energiemenge auch auf CO₂-Äquivalente umgerechnet. Dabei wurde auf Datensätze aus der Umweltdatenbank „ProBas“ des Umweltbundesamtes und des Öko-Institutes zurückgegriffen⁹. Diese wurden unter Zuhilfenahme der Wirkungsmethode CML, 2001 (baseline) und unter Verwendung der open-source Software openLCA in CO₂-Äquivalente umgerechnet.

Tabelle 22: Berechnung der CO₂-Einsparungen

Unternehmen	Materialart	Materialeinsparung [t] pro Jahr	Ermitteltes CO ₂ - Äquivalent pro t Material*	Eingesparte CO ₂ - Äquivalente [kg]
Sebald Schleifscheiben	Phenolharz	1,075	2.020,0	2.171,5
	Feldspat	1,075	keine Angaben	
Lauterbach-Kießling	Beton	20	752,0	15040,0
Federnfabrik Dietz	Metallkupferdraht	3,2	233,3	746,4
	Edelstahl (1.4310/1.4320)	6,4	4214,0	26969,6
Summen		31,75		44.927,5

*) Datengrundlage: "Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (ProBas)" des Umweltbundesamtes und des Öko-Instituts unter Verwendung der Software openLCA (Wirkungsmethode: CML, 2001 (baseline), April 2013)

Die aus den Datensätzen errechnete Einsparung ergibt sich zu 44.927,5 kg CO₂-Äquivalenten.

3.2 Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Maßnahmen zu Weiterverbreitung des erworbenen Wissens beschrieben. Um eine breite Öffentlichkeit zu erreichen, wurden neben Vorträgen auch Beiträge in Printmedien platziert. Außerdem wurden die erarbeiteten Methoden und die Systematik auch in der Hochschullehre und in Industrieprojekten implementiert.

3.2.1 Verbreitung durch Vorträge

Die erste Pressemeldung der Universität Bayreuth über den Projektstart von REVisER stieß auf große Beachtung seitens der Interessensgruppen aus dem Bereich der Ressourceneffizienz. So wurde direkt ein enger Kontakt zum Netzwerk Ressourceneffizienz geknüpft, dessen Partner u.a. auch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt ist. Das Projektteam von REVisER war auf Einladung des Netzwerks auf der 11. Netzwerkkonferenz Ressourceneffizienz (NERESS) in Berlin vertreten. Auf der 12. Netzwerkkonferenz mit dem Thema „Ressourceneffizienz als Innovationstreiber – heute und zukünftig“ konnte ein Vortrag über das Forschungsprojekt REVisER platziert werden, der auf reges Interesse stieß.

⁹ www.probas.umweltbundesamt.de/, aufgerufen am 01.08.2014

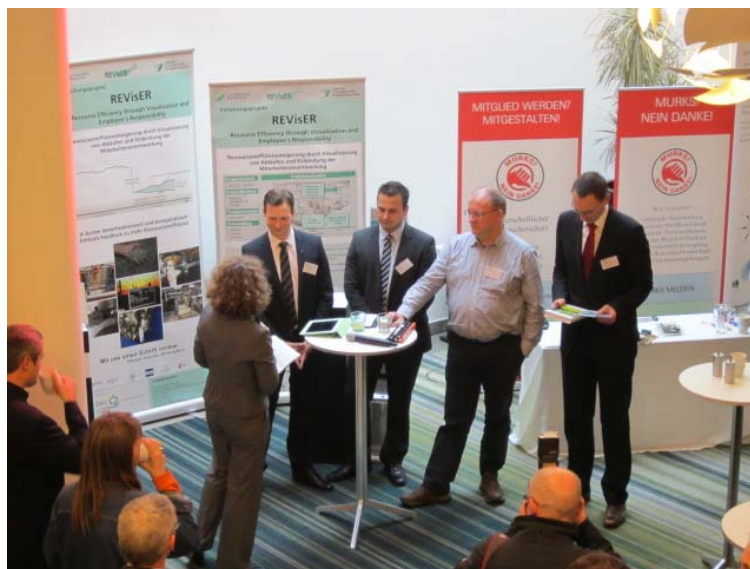


Abbildung 31: Impressionen des REVisER-Vortrags auf der 12. NERESS

Im Nachgang der NERESS wurde der Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik bzw. die an diese angeschlossene Fraunhofer-Projektgruppe Prozessinnovation Partner des Netzwerkes Ressourceneffizienz. Aus den sich hieraus ergebenden Kontakten wurde der Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik beauftragt, ein Seminar zum Thema Ressourceneffizienz zu entwickeln und durchzuführen. Ein weiterer Auftrag war die Ausrichtung der Veranstaltungsreihe „Ressourceneffizienz vor Ort“. Diese Veranstaltungen werden im April 2015 stattfinden und ebenfalls zur Verbreitung der in REVisER erarbeiteten Ergebnisse beitragen.

Am 1. Juli 2014 war das Forschungsprojekt REVisER mit einem Beitrag auf der 5. PIUS-Länderkonferenz mit dem Titel: „Der Mensch im Fokus der Ressourceneffizienz – Mit Transparenz und Sensibilisierung zu effizienten Prozessen“ vertreten.

Neben Netzwerkveranstaltungen konnte eine enge Kooperation mit den Industrie- und Handelskammern (IHK) genutzt werden, um die in REVisER erarbeitete Systematik in die industrielle Praxis zu überführen. Dazu wurden sowohl am 11.02.2014 bei der IHK Südthüringen in Suhl und am 27.02.2014 bei der IHK Ostthüringen in Gera Materialeffizienzveranstaltungen abgehalten. Eine weitere Veranstaltung ist am 19. November 2014 bei der IHK Lahn-Dill in Dillenburg geplant.

3.2.2 Verbreitung durch Printmedien

Eine Verbreitung in Printmedien fand auch u.a. in Kooperationen mit verschiedenen IHKs statt. So wurde in dem Magazin der IHK Oberfranken in der Ausgabe 11/13 der Artikel *Mitarbeitermotivierte Prozessoptimierung – Eine Chance für produzierende Unternehmen* veröffentlicht. In dem Magazin der IHK Ostthüringen konnte der Artikel *Ressourceneffizienz: Mitarbeiter motivieren!* im Februar 2014 platziert werden.

Weitere Veröffentlichungen fanden im Tagungsband der 5. PIUS-Länderkonferenz (*Der Mensch im Fokus der Ressourceneffizienz – Mit Transparenz und Sensibilisierung zu effizienten Prozessen*) sowie dem Remanufacturing Update Research & Development News des Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik (*Motivated Process Optimization – The next step in Remanufacturing?*) statt.

In der ersten Ausgabe 2014 des Fachmagazins ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb wurden wissenschaftliche Erkenntnisse aus ReViSER erstmals veröffentlicht. Der Artikel *Motivierte Prozessoptimierung, eine Methode moderner Kommunikations- und Visualisierungstechnik zur Realisierung effizienter Prozesse* wurde zeitweise zum meistgelesenen dieser Ausgabe.

Eine großflächige Verbreitung erfolgt mit dem Vertrieb des in REViSER erarbeiteten Leitfadens. Dieser erscheint in der Reihe *Leitfaden für die Bildungspraxis*. Diese Reihe hat eine der höchsten Verkaufszahlen der Leitfäden des W. Bertelsmann Verlags. Unter dem Titel „*Ressourceneffizienz in Unternehmen: Visualisierungstechnik nutzen - Mitarbeiter/-innen motivieren*“ finden zukünftig interessierte Leser die komplette Systematik in didaktisch aufbereiteter Form. Der praxisorientierte Leitfaden zeigt auf, wie Schwachstellen im Material- und Energieeinsatz gezielt identifiziert und geeignete Einsparpotenziale systematisch umgesetzt und im Unternehmen verankert werden können. Darüber hinaus werden auch die Bedeutung der und Ansätze zur Mitarbeiterbindung und -motivation umfassend erläutert.

Eine internationale Veröffentlichung sowie eine Veröffentlichung in dem Magazin der IHK Lahn-Dill sind in Planung.

3.2.3 Verbreitung durch Lehre

Erstmals im Sommersemester 2014 fand die in REViSER erarbeitete Systematik Einzug in die Lehre an der Universität Bayreuth. Im Rahmen der Vorlesung „Planung und Produktion 2“ wurde in der Vorlesungseinheit „Ressourceneffiziente Produktion“ das in REViSER aufgebaute Wissen den Studenten vermittelt. Diese Art der Verbreitung ist eine besonders nachhaltige, da mit dieser Vorlesung zukünftige Experten für Ressourceneffizienz und Umweltschutz qualifiziert werden.

Weiterhin wurde ein Demonstrator in die Lernfabrik des Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik integriert, der das Wissen um die monetären und ökologischen Auswirkungen von Druckluft Einsatz vermittelt. Dieser wird in Schulungen von Studenten und Mitarbeitern aus der Industrie eingesetzt.

3.2.4 Weckung von Industrieinteresse

Die Weckung von Industrieinteresse erfolgt durch den Vertrieb des Leitfadens, durch den Kooperationspartner des Projektes REVisER Wibond Informationssysteme sowie durch die Industrieberatung des Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik.

Zusätzlich zu dem Vertrieb des Leitfadens wird eine moderne Form des Dialogmarketings verwendet, um den Einzug von motivierender Visualisierungstechnik zur Steigerung der Ressourceneffizienz voranzutreiben. Ergänzend zu dem Leitfaden wird die in ReViSER erarbeitete Softwareanwendung angeboten. Diese ist im Preis des Leitfadens bereits enthalten. Im Gegensatz zu dem herkömmlichen Weg, ergänzende Softwareanwendung zum Download bereitzustellen, soll die Software nur nach einer Bestellung per Email verschickt werden. Dies fördert den Dialog zwischen den Lesern und den Experten des Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik, die somit direkt Hilfestellungen anbieten oder auf Fördermöglichkeiten für ressourceneffizienzsteigernde Maßnahmen hinweisen können.

Durch die in REVisER gesammelten Erkenntnisse ist es für den Kooperationspartner Wibond möglich, ein neues Geschäftsfeld zu entwickeln. Dies begründet sich mit dem neuen Anwendungsfeld für Visualisierungstechnik. Dadurch kann Wibond seine Wettbewerbsfähigkeit weiter ausbauen und zusätzliche Kunden gewinnen. Die Bewerbung des neuen Geschäftsbereichs erfolgt mit Produktflyern sowie der unternehmenseigenen Homepage.

Das Wecken von Industrieinteresse seitens des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik erfolgt durch die Aufnahme von Visualisierungstechnik in das Leistungsangebot der Industrieberatung. Beworben wird das erweiterte Leistungsangebot mittels Vorträgen, Präsentationen, dem Demonstrator in der Lernfabrik und im direkten Kundenkontakt.

4 Fazit und Ausblick

Neben den technischen Handlungsebenen der Veränderung von Prozessen, der Erneuerung von Maschinen und der Verbesserung von Anlagen, ist ein entscheidender Ansatzpunkt ein ressourceneffizientes Mitarbeiterverhalten. Durch die Befähigung der Mitarbeiter zu ressourcenschonendem Denken und Handeln kann mit vergleichsweise geringen Investitionskosten ein deutlich reduzierter Verbrauch von Ressourcen erreicht werden. Die Einsparung kann bei den Ressourcen Material und Energie im hohen zweistelligen Bereich liegen. Besonders hohe Einsparungen werden erzielt, indem Mitarbeiter an den Ersparnissen partizipieren. Weiterhin lässt sich festhalten, dass sowohl die Informationsmenge als auch die eingesetzte Visualisierungstechnik sowie die Darstellungsformen keinen Einfluss auf die Ressourcenoptimierung haben. Besonders wichtig sind hingegen verständliche und bekannte Formen, Einheiten und Zielgrößen. Auch muss für eine Optimierung mittels Visualisierung sowohl Prozesstransparenz als auch eine dauerhafte Sensibilisierung gegeben sein. Der Einsatz von Visualisierungstechnik zur Ressourcenoptimierung bringt folgende Vorteile:

- Produktunabhängig einsetzbar
- Branchenunabhängig einsetzbar
- Niedrige Investitionskosten
- Steigerung der Prozesskenntnisse
- Ermöglicht Wissenstransfer

Jedoch können mit der Visualisierung nur spezifische Verbräuche optimiert werden. Aufgrund der aufwendigen Messtechnik im Bereich des Materialverbrauchs ist eine eigenständige Einführung durch die Mitarbeiter nur bei den wenigsten KMU möglich.

Forschungsbedarf gibt es daher weiterhin in der Entwicklung von Messtechnologien zur Erfassung von Materialverbräuchen. Diese müssen übertragbar sein, wie beispielsweise die Sensorik zur Verbrauchsmessung von Stanz-Biege-Automaten.

Weiterhin besteht Forschungsbedarf in der Fertigungsorganisation hinsichtlich Materialeffizienz. Dies kann ein Konzept sein, dass der Unternehmer auch ohne Investitionen und externe Expertise bewerkstelligen kann. Besonders interessant ist es daher, Materialeffizienz als Zielgröße einer Produktion festzulegen und die Fertigung dahin gehend zu organisieren. Tiefgehend müssen dabei die Wechselwirkungen unterschiedlicher Organisationsbereiche analysiert werden.

Das Projekt REVisER hat alle Vorgaben des Projektantrags erfüllt. Im Bereich der entwickelten Softwareanwendung und den realisierten Interventionen wurden die Vorgaben des Antrags übertroffen. Insgesamt können die Kooperationspartner mit der beschriebenen Systematik Materialeinsparungen erreichen, welche dem Gewicht von mehr als 25 VW Golfs entsprechen. Zudem können Energieeinsparungen realisiert werden, die dem Bedarf von einem vier Personenhaushalt über 2,3 Jahre gleicht.

5 Literaturverzeichnis

- [Atk57] Atkinson, J. W.: Motivational Determinants of Risk-taking Behavior. Psychological Review 64 (1957) 6, S. 359 – 372.
- [Bec10] Beckmann, J.; Heckhausen H.: Motivation durch Erwartung und Anreiz. In: J.; Heckhausen H (Hrsg.): Motivation und Handeln. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2010.
- [Bre12] Brede, G.: Mitarbeiterführung – Leiten, Motivieren, Kooperieren, Berlin 2012.
- [DIN11] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN ISO 50001: 2011 Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung; Deutsche Fassung, 2011.
- [Eme13] Emec, S.; Stock, T.; Bilge, P.; Tufinkgi, P.; Kaden, C.; Seliger, G.: Analyse von Potenzialen der Material- und Energieeffizienz in ausgewählten Branchen der Metall verarbeiteten Industrie. Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, 2013, S.70-71.
- [EuK11] N.N.: Europäische Kommission, Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO2-armen Wirtschaft bis 2050, Brüssel, 2011.
- [FhG08] Fraunhofer-Gesellschaft (Hrsg.): Energieeffizienz in der Produktion, München: 2008.
- [Hac76] Hackman, J. R.; Oldman, G.R.: Motivation through the Design of Work: y. Organizational Behavior and Human Performance 16 (1976), S. 250- 279.
- [KfW09] Wied,T.; Brüggemann, A.: Material- und Rohstoffeffizienz in Unternehmen. In: KfW Bankengruppe (Hrsg.): Perspektive Zukunftsfähigkeit – Steigerung der Rohstoff und Materialeffizienz. KfW Bankengruppe, Frankfurt a. M. 2009.

- [Mae10] Mählick, H.: Visualisierung in der Produktion. Wissenschaft & Praxis: Sternenfels: 2010, S. 24 ff.
- [Rad01] Radgen, Peter, Compressed Air Systems in the European Union, LOG_X Verlag, Stuttgart, 2001.
- [Ran08] Rank, Susanne: SAP Implementierungsprojekt in einem lateinamerikanischen Energiekonzern. In: Rank, Susanne/ Scheinpflug, Rita (Hrsg.), 2008:185: Changemanagement in der Praxis, Erich Schmidt: Berlin.
- [Sch01] Schuler, H.; Prochaska, M.: LMI. Leistungsmotivationsinventar. Dimensionen berufsbezogener Leistungsorientierung, Göttingen 2001.
- [Sch04] Schmid, S.: Energieeffizienz in Unternehmen: eine handlungstheoretische und wissensbasierte Analyse von Einflussfaktoren und Instrumenten. Zürich: Vdf Hochschulverlag AG, 2004, S. 15.
- [Sch12] Schepers, S.W.; Meyer, G.; Wulf, S.; Nyhuls, P.: Ressourceneffizienz kontinuierlich entwickeln- Verbesserung der Ressourceneffizienz in bestehenden Produktionsbetrieben. wt Werkstatttechnik online 103, (2012) 4, S. 265.
- [Sla12] Slawik, S.: Determinanten und Optimierungsmethoden industrieller Ressourceneffizienz (Dissertation). In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Fortschritte in Konstruktion und Produktion, Bd. 22. Shaker Verlag, Aachen 2012.
- [Spa09] Spath, D.; Böhner, J.; Koch, S.: Human Factors in Flexibility Concepts for Intralogistics. In: International Foundation for Production Research (Hrsg.): Science and Technology to Promote Harmonized Production. International Conference on Production Research, ICPR 20. Shanghai, 2009.
- [Ste14] Steinhilper, R.; Nix, M.; Süchting, M.; Meier, J.: Motivierte Prozessoptimierung - Eine Methode moderner Kommunikations- und

Visualisierungstechnik zur Realisierung effizienter Prozesse. Motivierte Prozessoptimierung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (1-2), 2014.

[Sch00] Schuler, H.; Prochaska, M.: Entwicklung und Konstruktvalidierung eines berufsbezogenen Leistungsmotivationstests. In: Diagnostica. 46, 2, 2000, S. 61–72, 2000.

[Wue13] Wuest, T.; Dittmer, P.; Veigt, M.; Thoben, K.-D.: Ressourceneffiziente Fertigungssteuerung – Qualitätsbasierte Auftragszuordnung durch Produktzustandsbetrachtung. wt Werkstatttechnik online 103 (2013) 2, S. 100ff.

6 Anhang

Anhang: Ausprägung der Leistungsmotivation

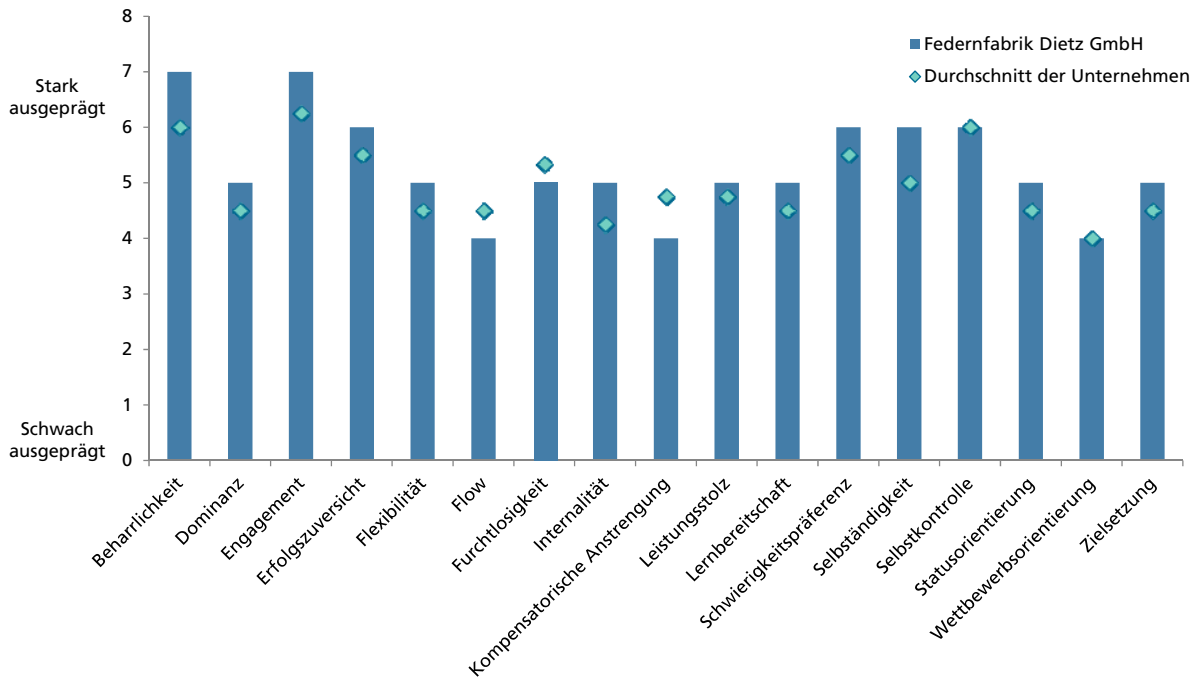


Abbildung 32: Leistungsmotivation Federnfabrik Dietz

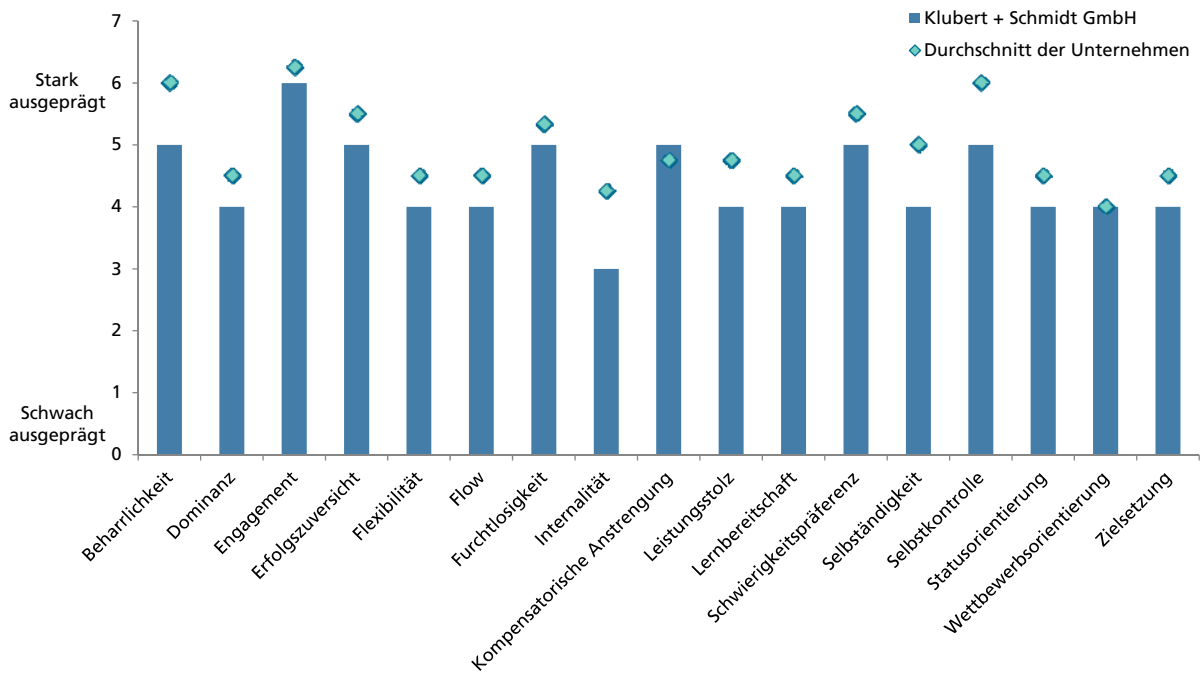


Abbildung 33: Leistungsmotivation Klubert + Schmidt

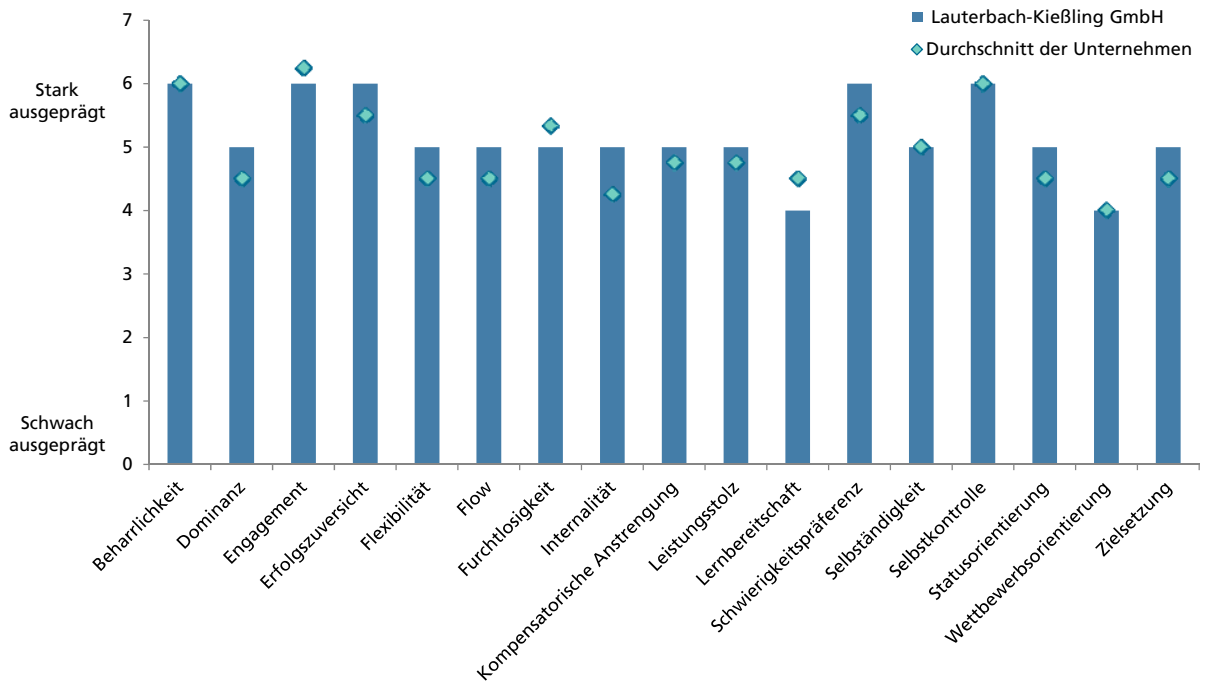


Abbildung 34: Leistungsmotivation Lauterbach-Kießling

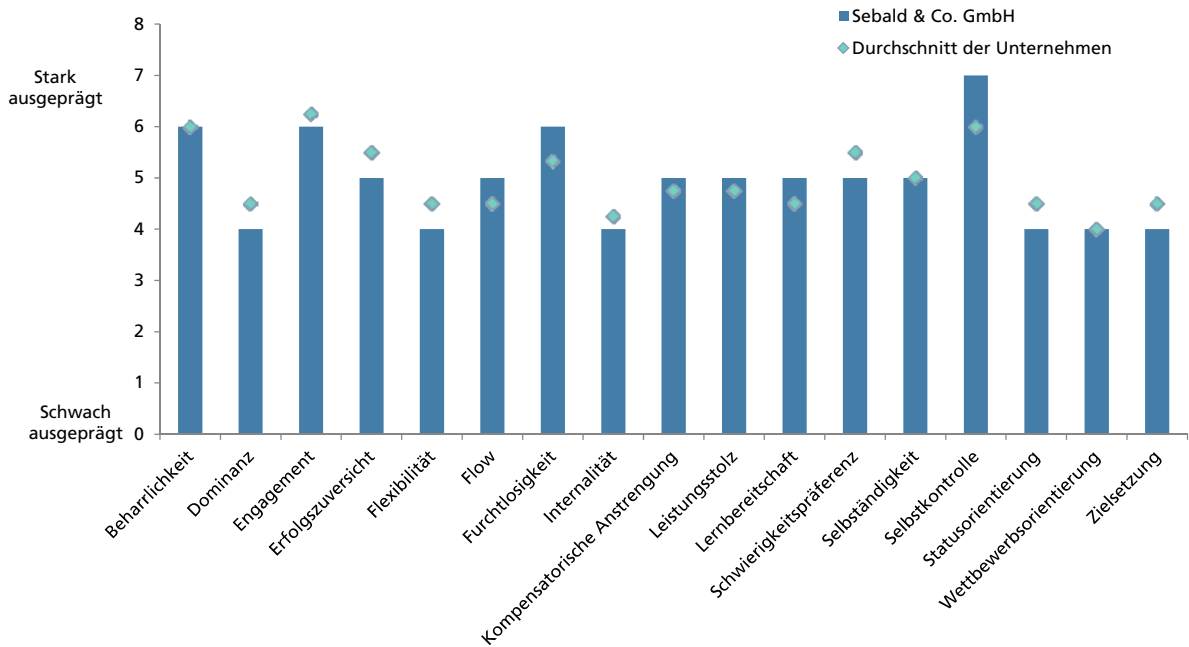


Abbildung 35: Leistungsmotivation Sebald Schleifscheiben

Anhang: Screenshots der Software „Effizienzsteigernde Methoden der Motivation“

Bitte wählen Sie die Charakteristika Ihres Unternehmens aus. Beachten Sie dabei, dass pro Unterkategorie jeweils nur eine Möglichkeit ausgewählt werden kann. Die Einzelbetrachtung der Methoden der Motivation ist dann im nächsten Schritt durch einen Klick auf die Buttons möglich. Dort können Sie Ihre Angaben bezüglich der Produktion und Logistik detaillierter gestalten.

Charakteristika Ihres Unternehmens

Organisation

Betriebsklima <input type="radio"/> Positiv <input checked="" type="radio"/> Neutral <input type="radio"/> Negativ	Organisationsgröße <input type="radio"/> <50 <input checked="" type="radio"/> <100 <input type="radio"/> ≥100	Schichtsystem <input type="radio"/> 1 Schicht <input checked="" type="radio"/> 2 Schichten <input type="radio"/> 3 Schichten
--	---	--

Produktionsprozess

Stückzahl pro Schicht <input type="radio"/> Hoch <input checked="" type="radio"/> Mittel <input type="radio"/> Gering	Automatisierungsgrad <input type="radio"/> Hoch <input checked="" type="radio"/> Mittel <input type="radio"/> Gering	Mitarbeiterverantwortung <input type="radio"/> Hoch <input checked="" type="radio"/> Mittel <input type="radio"/> Gering
Variantevielfalt <input checked="" type="radio"/> Hoch <input type="radio"/> Mittel <input type="radio"/> Gering	Fertigungsprinzip <input type="radio"/> Inselprinzip <input type="radio"/> Werkbankprinzip <input type="radio"/> Fließprinzip <input checked="" type="radio"/> Werkstattprinzip <input type="radio"/> Baustellenprinzip	

Wirtschaftliches Umfeld

Umsatzwachstum <input checked="" type="radio"/> Wachsend <input type="radio"/> Konstant <input type="radio"/> Rückläufig	Investitionsbereitschaft <input checked="" type="radio"/> Vorhanden <input type="radio"/> Bedingt <input type="radio"/> Keine
--	---

Auswahl zurücksetzen

Abbildung 37: 1. Eingabe der Unternehmenseigenschaften

Methoden der Motivation

Vergleiche

Zu Referenzwert oder
Zielwert

Innerhalb der Gruppe

Einzelne
Mitarbeiter

Innerhalb der Schicht

Vergütung

Gutscheine

Prämienlohn

Mitarbeiterbeteiligung

Personalführung

Kommunikation

Mitarbeitergespräch

Situatives Feedback

Zielvereinbarungen

Sonstige

Nicht monetäre
Belohnung


Auszeichnung
Einzelner

Auszeichnung Gruppe

Betriebliches
Vorschlagwesen

Flexible
Arbeitszeiten

Weiter mit:

Energie betrachten 

Material betrachten

Abbildung 38: 2. Eingabe der zu betrachtenden Ressource

Nachfolgend sind die von Ihnen ausgewählten Charakteristika Ihres Unternehmens aufgelistet. Wenn Sie diese überarbeiten wollen - durch einen Mausklick auf die Taste mit der Aufschrift "Neustart" gelangen sie wieder zum vorhergehenden Auswahlmü.

Gewählte Charakteristika Ihres Unternehmens

Organisation

Betriebsklima: Neutral

Organisationsgröße: <100

Schichtsystem: 2 Schichten

Produktionsprozess

Stückzahl pro Schicht: Mittel

Automatisierungsgrad: Mittel

Mitarbeiterverantwortung: Mittel

Variantenvielfalt: Hoch

Fertigungsprinzip: Werkstattprinzip

Wirtschaftliches Umfeld

Umsatzwachstum: Wachsend

Investitionsbereitschaft: Vorhanden

Energie betrachten

Mögliche Verschwendung

- Im Werk
- Im Arbeitsbereich
- Am Arbeitsplatz

Verschwendung beim Druckluftverbrauch

- Mangelnde Transparenz
- Falsche Einschätzung

Verschwendung beim Einrichten

- Mangelnde Transparenz
- Fehlende Arbeitsanweisung

Neustart

Abbildung 39: 3. Ausschussbereich und der Ausschussursache - Energie

Nachfolgend sind die von Ihnen ausgewählten Charakteristika Ihres Unternehmens aufgelistet. Wenn Sie diese überarbeiten wollen - durch einen Mausklick auf die Taste mit der Aufschrift "Neustart" gelangen sie wieder zum vorhergehenden Auswahlmü.

Gewählte Charakteristika Ihres Unternehmens

Organisation

Betriebsklima: Neutral

Organisationsgröße: <100

Schichtsystem: 2 Schichten

Produktionsprozess

Stückzahl pro Schicht: Mittel

Automatisierungsgrad: Mittel

Mitarbeiterverantwortung: Mittel

Variantevielfalt: Hoch

Fertigungsprinzip: Werkstattprinzip

Wirtschaftliches Umfeld

Umsatzwachstum: Wachsend

Investitionsbereitschaft: Vorhanden

Neustart

Material betrachten

Möglicher Ausschuss


- Im Produktionsprozess
- Durch Transport und Lagerung
- Durch Produkt- oder Variantenwechsel


Ausschuss im Produktionsprozess


- Material nicht oder schlecht verarbeitbar
- Mehrverbrauch aufgrund von Nacharbeit
- Maschinenfehler
- Mitarbeiterfehler
- Erhöhter Verschleiß

Abbildung 40: 3. Ausschussbereich und der Ausschussursache - Material

gefördert durch

DBU  Deutsche Bundesstiftung Umwelt

 f-bb
Forschungsinstitut
Betriebliche Bildung

UP  Lehrstuhl
Umweltgerechte
Produktionstechnik

Methoden der Motivation

Vergleiche

Zu Referenzwert oder Zielwert Innerhalb der Gruppe Einzelne Mitarbeiter Innerhalb der Schicht

Vergütung

Gutscheine Prämienlohn Mitarbeiterbeteiligung

Personalführung

Kommunikation Mitarbeitergespräch Situatives Feedback Zielvereinbarungen

Sonstige

Nicht monetäre Belohnung Auszeichnung Einzelner Auszeichnung Gruppe Betriebliches Vorschlagwesen

Flexible Arbeitszeiten

Diese Auswahl zurücksetzen Material betrachten Beenden

Abbildung 41: 4. Auswahl der Motivationsmethode

Anhang: IP-Schutzklassen

Die Schutzklassen beschreiben die Eignung eines elektrischen Betriebsmittels (zum Beispiel Maschinen, Bildschirme, Leuchten) für die Beanspruchung durch Fremdkörper und Wasser. Maßgeblich für die Unterscheidung der Klassen ist hier die Norm DIN EN 60529. Diese legt die Unterteilungskriterien und Bezeichnungen der verschiedenen Klassen fest und

ermöglicht so die Identifizierung via IP-Codes („Ingress Protection“ = deutsch „Schutz gegen Eindringen“) (vgl. VDE Verlag GmbH 2000):

Tabelle 23: IP-Code

Schutzart	Erste Kennziffer	Zweite Kennziffer
IP	6	5

1. Kennziffer

Die erste Ziffer des IP-Codes beschreibt sowohl den Schutzgrad vor eindringenden Fremdkörpern als auch die Absicherung vor Berührung durch Menschen. Es wird gemäß Tabelle 24 zwischen den folgenden Kategorien unterschieden:

Tabelle 24: Unterscheidung für 1. Kennziffer

1. Kennziffer	Schutz vor Fremdkörper	Schutz gegen Berührung
0	kein Schutz	kein Schutz
1	geschützt gegen feste Fremdkörper (Durchmesser >50 mm)	Schutz gegen große Körperoberfläche (z. B. Handrücken)
2	geschützt gegen feste Fremdkörper (Durchmesser >12 mm)	Schutz gegen Finger oder Ähnliches bis 80 mm Länge
3	geschützt gegen feste Fremdkörper (Durchmesser >2,5 mm)	Schutz vor Zugang mit Werkzeugen
4	geschützt gegen feste Fremdkörper (Durchmesser > 1 mm)	Schutz vor Zugang mit Drähten oder Streifen dicker als 1 mm
5	geschützt gegen Staub in schädigender Menge	vollständiger Schutz gegen Berührung
6	staubdicht	vollständiger Schutz gegen Berührung

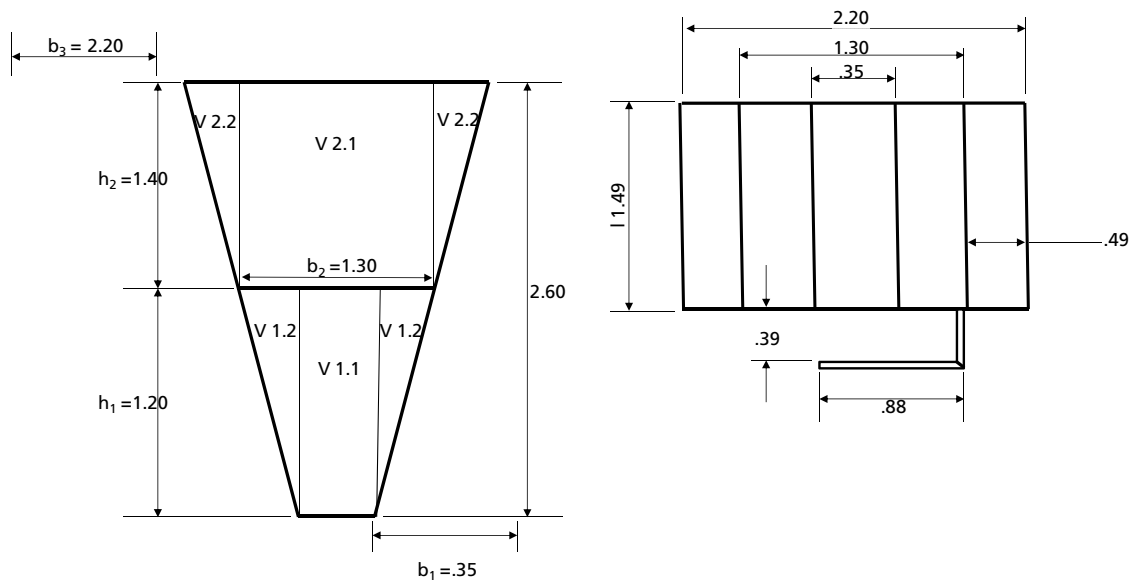
2. Kennziffer:

Die zweite Ziffer dient zur Kennzeichnung des Schutzes gegen eindringendes Wasser. Eine Übersicht der Klassenunterscheidungen bietet die Tabelle 25:

Tabelle 25: Unterscheidung für 2. Kennziffer

2. Kennziffer	Schutz gegen Wasser
1	kein Schutz
2	Schutz gegen Tropfwasser (senkrecht zu Gehäuse)
3	Schutz gegen Tropfwasser (bis zu 15° geneigt zu Gehäuse)
4	Schutz gegen Sprühwasser (bis zu 60° geneigt zu Gehäuse)
5	Schutz gegen Spritzwasser
6	Schutz gegen Strahlwasser (Düse; beliebiger Winkel)
7	Schutz gegen zweiteiliges Untertauchen
8	Schutz gegen dauerndes Untertauchen

Anhang: Berechnung der Füllmenge des Betontrichters



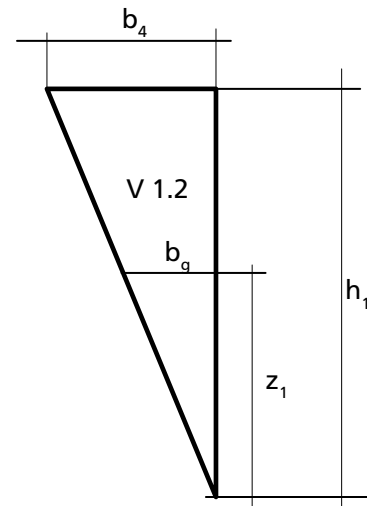
$$V_{ges} = V_1 + V_2$$

$$V_1 = V_{1.1} + V_{1.2} \quad V_1 = 0 \leq z_1 \leq 1.20$$

$$V_2 = V_{2.1} + V_{2.2} \quad V_2 = 0 \leq z_2 \leq 1.40$$

$$z_1 = \begin{cases} 1.20 & ; d_{max} - d_{aktuell} \geq 1.20 \\ d_{max} - d_{aktuell} & ; d_{max} - d_{aktuell} < 1.20 \end{cases}$$

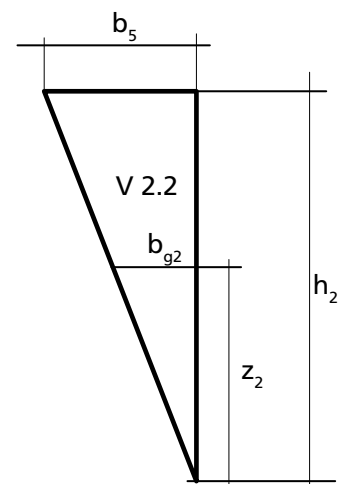
$$z_2 = \begin{cases} 0 & ; d_{max} - d_{aktuell} \geq 1.20 \\ d_{max} - d_{aktuell} - h_1 & ; d_{max} - d_{aktuell} < 1.20 \end{cases}$$



$$V_{ges} = V_1 + V_2 \quad V_1 = 0 \leq z_1 \leq 1.20$$

$$V = V_{1.1} + V_{1.2} \quad z_1 / h_1 = b_g / b_4$$

$$z_1 = \begin{cases} 1.20 & ; d_{max} - d_{aktuell} \geq 1.20 \\ d_{max} - d_{aktuell} & ; d_{max} - d_{aktuell} < 1.20 \end{cases}$$



$$V_{1.1} = b_1 \cdot l \cdot z_1 \quad V_{1.2} = \frac{1}{2} b_g \cdot l \cdot z_1 \quad \text{mit } b_g = z_1 b_4 / h_1$$

$$V_{1,2} = \frac{1}{2} (b_4 \cdot l \cdot z_1^2) / h_1 \quad \text{mit } b_4 = (b_2 - b_1) / 2 = 0,475$$

$$V_1 = 0,35 \cdot 1,49 \cdot z_1 + z_1^2 \cdot (0,475/1,2) \cdot 1,49$$

$$V_1 = 0,5215 \cdot z_1 + z_1^2 \cdot 0,59$$

$$V_{\text{ges}} = V_1 + V_2 \quad V_2 = 0 \leq z_2 \leq 1,40$$

$$V_2 = V_{2,1} + V_{2,2} \quad z_2 / h_2 = b_{g2} / b_5$$

$$z_2 = \left[\begin{array}{l} 0 \quad ; \quad d_{\text{max}} - d_{\text{aktuell}} \geq 1,20 \\ d_{\text{max}} - d_{\text{aktuell}} - h_1 \quad ; \quad d_{\text{max}} - d_{\text{aktuell}} < 1,20 \end{array} \right]$$

$$V_{2,1} = b_2 \cdot l \cdot z_2$$

$$V_{2,2} = \frac{1}{2} b_{g2} \cdot l \cdot z_2$$

$$\text{mit } b_{g2} = z_2 b_5 / h_2$$

$$V_{2,2} = \frac{1}{2} (b_5 \cdot l \cdot z_2^2) / h_2$$

$$\text{mit } b_5 = (b_3 - b_2) / 2 = 0,45$$

$$V_2 = 1,30 \cdot 1,49 \cdot z_2 + z_2^2 \cdot (0,45/1,4) \cdot 1,49$$

$$V_2 = 1,937 \cdot z_2 + z_2^2 \cdot 0,479$$

$$V_{\text{ges}} = V_1 + V_2 = 0,5215 \cdot z_1 + z_1^2 \cdot 0,59 + 1,937 \cdot z_2 + z_2^2 \cdot 0,479$$