

Nachhaltigkeit von Maschinen und Anlagen in der Produktion systematisch bewerten

OES: Indikator für nachhaltiges Anlagenmanagement

L. Kulow, T. Adolf, D. Lucke, H. Willerscheid

ZUSAMMENFASSUNG Das Erreichen von Nachhaltigkeitszielen gewinnt für Fabriken immer mehr an Bedeutung. Für die Umsetzung werden praxisorientierte Messgrößen benötigt, um alle produktionsrelevanten Nachhaltigkeitsaspekte zu berücksichtigen und den Aufwand zu begrenzen. In diesem Beitrag wird die „Overall Equipment Sustainability – OES“ als Kennzahl vorgestellt, die wirtschaftliche, ökologische und soziale Aspekte adressiert und es ermöglicht, Anlagen und Prozesse zu bewerten, zu vergleichen und zu optimieren.

STICHWÖRTER

Produktionsmanagement, Strategie, Nachhaltigkeit

OES – KPI for a sustainable production equipment management

ABSTRACT Achieving sustainability objectives is becoming increasingly important for factories. Practical metrics are required for implementation while taking all production-relevant sustainability aspects into account and limiting the effort involved. This paper presents the KPI “Overall Equipment Sustainability – OES” that addresses economic, environmental, and social aspects and enables comparing and evaluating production equipment.

1 Motivation

Fabriken unterliegen einem permanenten Transformationsprozess, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Die Wirtschaftlichkeit war und ist das bestimmende Kriterium [1]. Angesichts begrenzter natürlicher Ressourcen und Klimaveränderungen findet auf gesellschaftlicher Ebene eine zunehmende Sensibilisierung hinsichtlich Lebensqualität und Umweltzerstörung statt.

Im Nachhaltigkeitsbegriff werden diese wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Aspekte adressiert. Die Entwicklungen werden von der Politik aufgegriffen und in Gesetzen und Richtlinien umgesetzt [2]. Beispiele sind die EU-weite „Corporate Sustainability Reporting“-Richtlinie, das Lieferkettengesetz, die Ökodesign-Verordnung oder steigende Mindestlöhne, welche Unternehmen zwingen, ökologische oder soziale Aspekte der Nachhaltigkeit stärker zu berücksichtigen [3]. Zudem sind eine Erweiterung und Verschärfung der Anforderungen, insbesondere in den Bereichen Umwelt und Soziales, in den kommenden Jahren absehbar. Ein Beispiel ist der steigende CO₂-Preis, der ein Anreiz für Fabriken ist, Nachhaltigkeitsmaßnahmen zu fördern. Deswegen sind laut statistischem Bundesamt die Industrie-Investitionen in Klimaschutz binnen zehn Jahren um 74 % gestiegen [4]. Das spiegelt sich auch in Lieferengpässen bei Rohmaterial und rapide steigenden Energiepreisen wider, was einen effizienten Umgang mit knappen und teuren Ressourcen erfordert [5].

Die aktuellen Bestrebungen und Nachhaltigkeitsberichte finden meist auf Unternehmensebene statt. Deshalb werden in der Produktion Methoden und Werkzeuge benötigt, um die Ziele und Anforderungen umzusetzen, Ressourcen und Kosten intelligent

einzuhalten, einen wirksamen Beitrag zum Umweltschutz zu leisten und gesellschaftliche Verantwortung zu übernehmen.

Verbreitet sind die Umweltmanagementnorm ISO 14001 und das darauf aufbauende europäische Nachhaltigkeits-Management-System EMAS. Weiterhin gibt es eine Vielzahl von Bewertungskriterien für die Umweltleistung, inklusive Leistungskennzahlen (Kernindikatoren), welche für die erfolgreiche Durchführung unabdingbar sind. Jedoch gestaltet sich die Bewertung oft zeitintensiv und in der Praxis komplex oder sie ist branchenabhängig und es fehlt die nötige Flexibilität für eine breite Anwendung [6]. Teilweise ist die fehlende Praxistauglichkeit auf die mangelnde Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie zurückzuführen [2]. Diese Probleme müssen überwunden werden, um ein praxisgerechtes Instrument zur Nachhaltigkeitsbewertung in der Produktion zu entwickeln, das als Entscheidungshilfe genutzt werden kann, die nachhaltige Entwicklung fördert und das Lernen in einer Organisation in Bezug auf Nachhaltigkeit verbessert kann.

2 Stand der Technik und Forschung

Im Folgenden werden Ansätze und Standards vorgestellt, die in der Produktion zur Nachhaltigkeitsbewertung angewendet werden.

Der Standard der Global Reporting Initiative (GRI) ist der weltweit erste Rahmen für eine unternehmensweite Nachhaltigkeitsberichterstattung und erlaubt durch eine reduzierte Anzahl von Kernindikatoren kombiniert mit spezifischen Indikatoren einen Branchenvergleich [6].

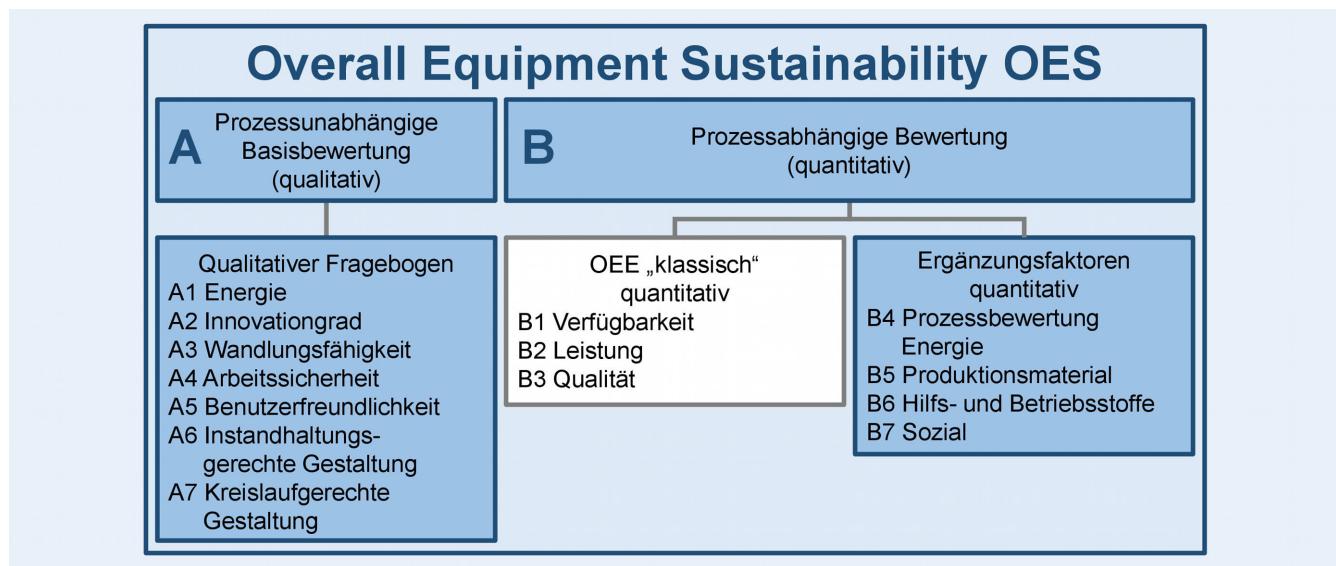


Bild 1. Aufbau der Overall Equipment Sustainability (OES)-Kennzahl. Grafik: Fraunhofer IPA

In Europa ist das sogenannte Eco Management and Audit Scheme (EMAS) etabliert. Es baut auf der Norm ISO 14001 auf und legt darüber hinausgehende Qualitätskriterien und Überwachungsmechanismen fest. Durch den Ablauf von Planung, Durchführung, Kontrolle und Verbesserung sollen die Umweltleistung des Unternehmens verbessert, rechtliche und sonstige Verpflichtungen erfüllt und Umweltziele erreicht werden. Als Leitlinie zur Umweltleistungsbewertung bietet der Abschnitt ISO 14031 Anhaltspunkte zur Auswahl geeigneter Schlüsselleistungskennzahlen für die Darstellung der Umweltleistung des Unternehmens. Die ISO 14040 regelt das Vorgehen bei einer Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse. Hier müssen Input- und Outputströme ermittelt und quantifiziert werden, bevor deren Umweltauswirkung anhand von Werten aus Datenbanken (Wirkungsindikatorwerte) verrechnet werden. Mit der Norm ISO 26000 wird die gesellschaftliche Verantwortung von Unternehmen mithilfe eines Leitfadens praktikabel gemacht. [5]

Die zentralen Elemente der ISO 55000 definieren Konzepte und Instrumente für das Asset Management. Um ihren Wert zu maximieren, ist es wichtig, den Lebenszyklus zu dokumentieren und zu optimieren.

Weitere Beispiele sind die Richtlinie 2009/125/EG über Energieverbrauchsnormen für Werkzeugmaschinen und verwandte Maschinenprodukte sowie die Richtlinie 2005/32/EG über die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte. Auch in der ISO 14955-1:2017 wird die Anwendung von Ökodesign-Standards für Werkzeugmaschinen vorgeschlagen. Darüber hinaus konzentriert sich die ISO 14955 allgemein auf die Umweltauswirkungen von Maschinen, insbesondere auf die Möglichkeiten zur Reduzierung des Energieverbrauchs als wichtige Umweltauswirkung [7]. Ein energiebasierter Ansatz zur Quantifizierung der produktsspezifischen ökologischen Leistung ist der kumulierte Energiebedarf, der in der VDI-Richtlinie 4600 definiert wird [8].

Weitere Ansätze erweitern die in der Produktion geläufige Overall Equipment Effectiveness (OEE). Diese wird im Ansatz von Domingo & Aguado [9] zur OEEE erweitert, dabei steht das erste E in der Abkürzung für Environmental. Es wird der Nachhaltigkeitseinfluss jeder Maschine durch den Ecoindikator-99 berechnet und ins Verhältnis mit dem initialen Nachhaltigkeits-

einfluss der gesamten Produktion gesetzt, welche auf dieselbe Weise berechnet wird. Alternativ könnte in der Bestimmung der OEEE anstatt des Ecoindikators-99 auch die CO₂-Äquivalenz genutzt werden. Damit können Verbesserungen übersichtlich dokumentiert werden und Potenziale sind unter allen Maschinen unmittelbar ersichtlich. [9] Die Methode wurde durch reale Daten und CO₂-Emissionen verschiedener Maschinen überprüft. Es wurde eine negative Korrelation zwischen der OEEE und den Emissionen festgestellt [10].

Ein weiterer Ansatz ist der Indikator mit der Bezeichnung Sustainable Overall Throughput Effectiveness (S.O.T.E.). Er umfasst die Aspekte der OEE und einen Indikator für die Umweltleistung, der auf Indizes für Feinstaub basiert. Die Anwendung des S.O.T.E.-Indikators soll es den Unternehmen ermöglichen, Nachhaltigkeit als Kriterium in die unternehmerische Entscheidungsfindung einzubeziehen. [11]

Die OEE+ ergänzt die Verluste der OEE durch zwei weitere Faktoren, nämlich die Verluste beim Energieverbrauch und beim Energiemix und bildet durch den wichtigsten Nachhaltigkeitsindikator bei Maschinen die Nachhaltigkeitsverluste zu Effektivitätsverlusten ab [12].

In die Kombination der OEE mit der Materialeffizienz werden drei Faktoren einbezogen. Es kommen die Materialeffizienz, die Prozesskosten und die Materialkostenschwankungen hinzu. Somit berücksichtigt die Overall Resource Effectiveness (ORE), dass eine wirtschaftliche Investition in Materialien und Ressourcen erforderlich ist, um einen Herstellungsprozess durchzuführen. [13]

Die bestehenden Ansätze haben in der Produktion keine weite Verbreitung gefunden, da viele Ansätze nicht alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit abdecken oder die Erfassung der Messgrößen mit großem Aufwand verbunden ist, da zum Beispiel zusätzliche Sensoren installiert werden müssen.

3 Overall Equipment Sustainability (OES)

Das Ziel ist es, ein praxisgerechtes Instrument zur Nachhaltigkeitsbewertung in der Produktion zu entwickeln. Der Lösungsansatz erweitert die weit verbreitete OEE um vier Kennzahlen,

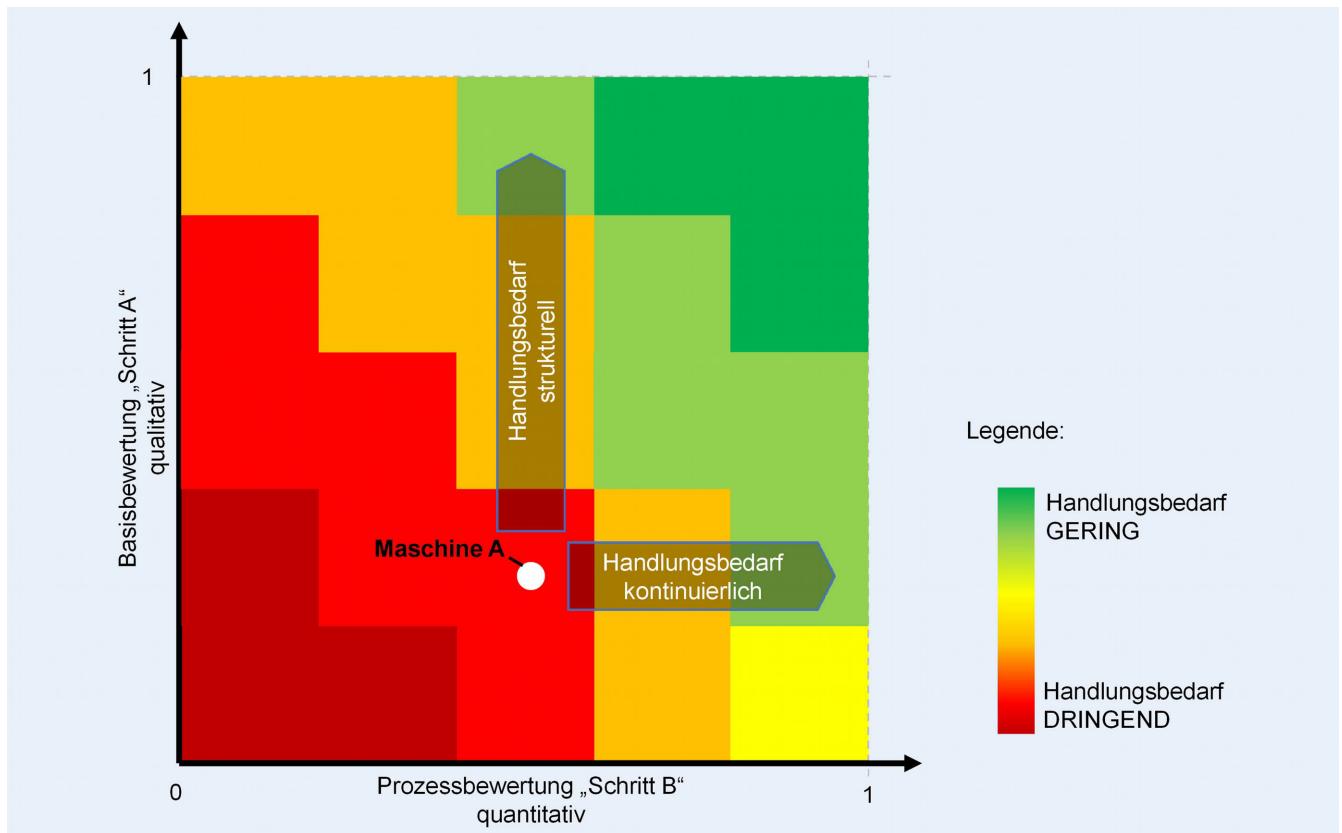


Bild 2. OES-Visualisierungsmatrix mit eingezzeichneter Beispielmaschine. *Grafik: Fraunhofer IPA*

sodass alle drei Aspekte der Nachhaltigkeit abgebildet werden und möglichst auf bereits vorhandene Daten zurückgegriffen wird. Das Ergebnis ist die neue Kennzahl „Overall Equipment Sustainability“ (OES).

Um die OES holistisch abilden zu können, werden prozessabhängige Nachhaltigkeitseinflüsse sowie prozessunabhängige Einflüsse betrachtet (Bild 1).

Die prozessabhängigen Indikatoren sind operative Leistungskennzahlen, während die prozessunabhängigen Indikatoren Eigenschaften der Maschine und Anlage oder des Produktionsumfelds der Maschine und Anlage umfassen. Für die prozessabhängigen Kennzahlen werden die ökologischen und sozialen Verlustarten, die während des Prozesses auftreten, identifiziert und Kategorien zugeordnet. Die ökonomische Dimension wird durch die drei Kennzahlen der OEE in die Bewertung integriert.

Vorteil dieser verlustbasierten Betrachtungsweise ist, dass Optimierungspotenziale durch Beseitigung unmittelbar ersichtlich und ausgeschöpft werden. Für eine holistische Nachhaltigkeitsbewertung werden zusätzlich relevante prozessunabhängige Indikatoren durch einen qualitativen Fragebogen aufgenommen. Damit erhält die OES – analog zur Subtraktion der geplanten Nichtproduktion (Wochenenden plus Feiertage) von der theoretisch möglichen Produktionszeit innerhalb eines Jahres bei der OEE – eine indikatorbasierte Zustandseinordnung zu Beginn der Analyse. Der Fragebogen beschreibt die Maschine mithilfe von ausgewählten Themenfragen aus den Bereichen Ökologie, Technologie und Soziales. Daraus ergibt sich ein zweistufiger Prozess, bestehend aus einer prozessunabhängigen Grundeinstufung der Maschine, gefolgt von einer prozessbezogenen Analyse des Maschinenbetriebs.

Zusammen bilden beide Kennzahlen die Koordinaten eines Vektors, der in einem Koordinatensystem abgebildet werden kann. Anschließend wird die gesamte Ergebnismenge in Bereiche unterteilt, um später die Maschine einem Bereich mit Maßnahmen zuzuordnen (Bild 2).

Die getroffene Klassifizierung wurde in 20-%-Schritten untergliedert. Dabei kann der Handlungsbedarf in strukturelle und kontinuierliche, prozessbezogene Maßnahmen eingeteilt werden, nach Umsetzung der Maßnahmen wird sich nach erneuter Bestimmung der OES der Vektor verändern und weiteres Optimierungspotenzial aufdecken.

3.1 Prozessunabhängige Basisbewertung

Die Basisbewertung besteht aus 35 Indikatoren in sieben Kategorien. Der Bewertungsprozess soll möglichst anwendungs-freundlich trotz seiner Anzahl an Indikatoren sein, weswegen qualitative Bewertungsskalen verwendet werden. Die Kategorien decken wesentliche ökologische, soziale und technische Indikatoren ab und gehen dabei speziell auf die Eigenschaften der jeweiligen Maschine im Zusammenhang mit den Rahmenbedingungen des Einsatzes im Produktionssystem ein.

3.1.1 Kategorie A1: Energie

Die Kategorie Energie besteht aus vier Indikatoren und bezieht die energetischen Aspekte der Maschine ein. Zunächst wird auf den Anteil erneuerbarer Energien eingegangen, der als Inputstrom in die Maschine eintritt. Dadurch wird eine aktive Beteili-

gung von Unternehmen hinsichtlich der Klimafreundlichkeit der verwendeten Energie erhofft [12].

Als zweiter Indikator wird die Energieflexibilität der Maschine in Betracht gezogen. Es wird dabei, vor dem Hintergrund eines wachsenden Anteils erneuerbarer Energien auf dem Markt, eine Adaptation von Leistungsbedarfen an das aktuelle Energieangebot berücksichtigt. Neben wirtschaftlichen Anreizen führt dieses Verhalten zu einer Entlastung des gesamten Energiemarktes und erleichtert einen weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien [14].

Der dritte Indikator berücksichtigt die Abwärmenutzung für Maschinen. Unterscheidungskriterien sind das Temperaturniveau, die Abwärmemenge, das Trägermedium oder deren Bündelung [15]. Damit einhergehend ist als vierter Indikator das An- und Abschaltverhalten der Maschine aufgeführt. Das Anlaufverhalten bezeichnet den Zeitraum, ab welchem die Maschine Gutteile produziert. Je verlässlicher und kürzer das Anlaufverhalten ist, desto größer sind die potenziellen Energieeinsparungen durch vermehrtes Abschalten der Maschine und seiner Nebenaggregate [16].

3.1.2 Kategorie A2: Innovationsgrad

Der Innovationsgrad bewertet die Integration der Maschine im Unternehmen und es werden zusätzlich technische Eigenschaften evaluiert. Diese ermöglichen den nachhaltigen Betrieb in der Produktion. Beispielsweise reduziert die Leichtbauweise einer Maschine bewegte Massen im Betrieb, also den verbundenen Energiebedarf [7]. Ein weiterer Indikator ist der Digitalisierungsgrad, der bestimmt, wie einfach, strukturiert oder umfangreich der Datenverkehr und die Schnittstellen der Maschine gestaltet sind.

Auch das Potenzial des automatisierten Betriebs wird in die Bewertung als weiterer Indikator miteinbezogen. Mit dem Indikator Betriebserfahrung wird abgebildet, ob der Hersteller der Maschine im Unternehmen bekannt ist und wie viel Erfahrung im Betrieb der Maschine vorhanden ist. Als letzter Indikator gibt die Technologiebeherrschung an, ob der Prozess, den die Maschine ausführt, im Betrieb vertraut ist oder ob es sich um ein neues Verfahren handelt, das sich noch in der Anlaufphase befindet.

3.1.3 Kategorie A3: Wandlungsfähigkeit

Die Wandlungsfähigkeit einer Maschine ist sowohl in ökologischer wie ökonomischer Hinsicht ein Treiber der Nachhaltigkeit [17]. Bei wandlungsfähigen Maschinen sind Innovationen durch Nachrüstung oder Umrüstung möglich, mehrfache Maschinen überflüssig, Ressourcen- und Energieeinsparungen einfacher umzusetzen und Störungen schneller zu beseitigen.

Die folgenden Indikatoren wurden von *Fechter et. al.* [18] als Wandlungsfähiger in der Automobilbranche identifiziert und fließen durch Befragungen in das Bewertungssystem ein: Die Kompatibilität beschreibt die Verträglichkeit mit den Systemanforderungen beziehungsweise die Verknüpfbarkeit mit anderen Fabrikobjekten. Die Mobilität bezieht sich auf die räumliche Beweglichkeit der Maschine, etwa im Fall einer Umgestaltung einer Fertigungslinie. Die Modularität der Maschine kann vorteilhaft bei Störungsbeseitigung oder bei der Gestaltung von Schnittstellen zur Umgebung sein. Die Neutralität gibt an, ob die Maschine ihre Umgebung negativ beeinflusst und Veränderungsmöglichkeiten innerhalb der Produktion eingrenzt. Die Beeinflussung der Maschinen untereinander durch Wärmestrahlung führt in der

Produktion zu Herausforderungen bei der Genauigkeit und Präzision durch Temperaturveränderung [8]. Die Skalierbarkeit ist im Hinblick auf Bedarfsschwankungen wichtig und beschreibt, ob es möglich ist, in die Maschine auch Innovationen, wie etwa neue Sensorik, zu integrieren. Zuletzt wird die Universalität aufgeführt, die aussagt, ob das Objekt für verschiedenste Aufgaben eingesetzt werden kann. [18]

3.1.4 Kategorie A4: Arbeitssicherheit

Grundsätzlich wird die Maschine im Rahmen der Bewertung nicht als Produkt, sondern als Arbeitsmittel betrachtet. Deswegen beziehen sich die sozialen Indikatoren auf die Wechselwirkung zwischen Arbeitsplatz und Mitarbeiter und weniger auf die Gesellschaft und die natürliche Umgebung. Für diese Kategorie müssen an der Maschine und in deren unmittelbarer Umgebung Messungen durchgeführt oder die Maschinenbediener befragt werden.

Zuerst wird abgefragt, ob die Maschine die europäischen Standards mit CE-Kennzeichnung und alle erforderlichen, unabhängigen Prüfverfahren erfüllt. Als nächstes wird auf den möglichen Kontakt mit Gefahrenstoffen jeglicher Form eingegangen. Vier Indikatoren werden mit kurzen Messungen im Regelbetrieb ermittelt: Das Temperaturniveau am Arbeitsplatz, der Lärmpegel, die Vibrationsbelastung und die Luftqualität, besonders mit Blick auf Feinstaub- oder Partikelbelastung. [5] Die kurzen Messungen dienen dazu, die qualitative Einschätzung besser einzuordnen.

3.1.5 Kategorie A5: Benutzerfreundlichkeit

Die Benutzerfreundlichkeit setzt sich zusammen aus einer ergonomischen Bewertung des Arbeitsablaufs und einer Einschätzung, wie groß der Schulungs- und Qualifikationsaufwand für die Bedienung und Betreuung der Maschine ist. Als essenzieller Bestandteil der korrekten und fehlerfreien Bedienung wird die Mensch-Maschine-Schnittstelle auf Aspekte der Übersichtlichkeit, Farbkennzeichnung und Informationssignale (Licht, Vibration oder Sprache) überprüft und eingestuft.

3.1.6 Kategorie A6: Instandhaltungsgerechte Gestaltung

In der Kategorie „Instandhaltungsgerechte Gestaltung“ werden die Bezüge zur Instandhaltung abgebildet. Mit dieser Kategorie soll erreicht werden, dass eine entsprechende Maschine so selten wie möglich gewartet werden muss und eine Störungsbeseitigung möglichst kurz dauert. Daher lauten die Indikatoren in diesem Bereich: Standardisierung der Komponenten, Funktionsbeständigkeit und Zuverlässigkeit, Ersatzteilverfügbarkeit, wartungsarme Komponenten und aktuelle technische Dokumentation (Maschinenhistorie).

Der Indikator Modularität aus Kategorie A3 könnte hier auch aufgeführt werden. Um Dopplungen zu vermeiden fließt jeder Indikator aber nur einmal in die Bewertung ein.

3.1.7 Kategorie A7: Kreislaufgerechte Gestaltung

Die letzte Kategorie bezieht sich auf das Lebensende der Maschine oder einzelner Maschinenkomponenten. Die Indikatoren bewerten die zerstörungsfreie Zerlegung und ihre anschließende Wiederverwertung, wenn möglich ohne Downgrading.

Weitere Elemente der kreislaufgerechten Gestaltung sind die Materialienauswahl und -zusammensetzung, der Recyclinganteil bei der Maschine und die sortenreine Trennbarkeit nach Zersetzung. Ziel ist eine möglichst effiziente Verwertung der Maschine nach Lebensende mit einer Rückführung der Ressourcen in wirtschaftliche Kreisläufe [19]. Für eine aufwandsarme Erfassung werden diese messbaren Größen qualitativ in Klassen erfasst.

3.2 Prozessabhängige Bewertung

Für die Prozessbewertung wurde festgelegt, die OEE (Kategorien B1–B3), die einen hohen Verbreitungsgrad besitzt, vollständig in die Bewertung zu integrieren. Diese deckt die ökonomische Nachhaltigkeit in der Prozessbewertung ab und wird um ökologische und soziale Aspekte erweitert. Dafür wurden die verschiedenen Betriebszustände nach ISO 12100 einer Produktionsmaschine als Modellstruktur herangezogen. Grundsätzlich unterscheidet die Norm zwischen dem Normalbetrieb und einem Störungsfall. In beiden Fällen kann sich die Maschine in drei Zuständen befinden. Entweder ist die Maschine eingeschaltet und produziert oder sie ist eingeschaltet und befindet sich im Standby oder sie ist ausgeschaltet. Diese drei Zustände unterscheiden sich in ihrem Energie- und Ressourcenverbrauch und können aus der Analyse einer Lastkurve über die Zeit abgelesen werden. Ein ähnliches Vorgehen nutzen Schudeleit *et al.* bei der Ermittlung eines „Total Energy Efficiency Index“ von Maschinen [20].

Von dieser Strukturierungsmethode nach ISO 12100 ausgehend, werden mögliche Verbräuche und Verluste, die in der Nutzungsphase der Maschine auftreten können, einem der sechs Betriebszustände (Produktion, Umrüstung, Bereitschaft, Stillstand, Störung, Wartung) zugeordnet.

Beispielhaft für die Logik hinter der Zuordnung wird diese für drei Indikatoren näher beschrieben. Die Materialeffizienz (Produktionsmaterial) ist sowohl im störungsfreien als auch im störungsbehafteten Betrieb von Bedeutung. Dennoch wird sie nur im Regelbetrieb mit Zieloutput angegeben, um Indikatoren nicht doppelt aufzuführen. Eine Leckage von Betriebsstoffen oder Kühl- und Schmierstoffen ist eine Abweichung vom Normalbetrieb und im Bereich mit Fehlverhalten aufgeführt. Das Auftreten einer Leckage ist nicht auf einen Betriebszustand begrenzt und kann über dem Betrieb hinaus auch im Standby-Zustand oder im ausgeschalteten Zustand bestehen. Daher wird die Leckage dem fehlerbehafteten Betriebszustand zugeordnet. Zudem gibt es eine Vielzahl an Vorgängen, die selbst im Normalbetrieb die Maschine bei kurzen bis mittellangen Stillständen in den Standby-Modus versetzen. Darunter zählen beispielsweise Prüfvorgänge, Rüstvorgänge oder Wartungsmaßnahmen. Die Tätigkeiten sind für den Prozess notwendig, aber nicht wertschöpfend, und ein geringer Anteil an Wartezeit ist wegen anhaltenden energetischen Verbräuchen anzustreben. [21]

Die aus energetischer Sicht ungünstigen Stillstandzeiten sind deswegen dem Normalbetrieb im Standby-Zustand zuzuordnen.

Als nächster Schritt werden alle identifizierten Verbräuche oder Verluste in vier Kategorien eingeteilt. Ziel ist eine Erweiterung der OEE um weitere vier Dimensionen mit ökologischem oder sozialem Schwerpunkt. Energie, Produktionsmaterial, Hilfs- und Betriebsstoffe und Soziales werden hier als Kategorien definiert. Eine fünfte Kategorie Umgebung wurde nicht aufgenommen, da Auswirkungen wie zum Beispiel Luft- und Wasserververschmutzung in der Praxis schwer auf die einzelne Maschine

zurückzuführen sind und daher auf Produktionsebene sinnvoller erscheinen.

Dem Beispiel der OEE folgend werden nun relative Kennzahlen gebildet. Diese beschreiben die identifizierten Verbräuche oder Verluste, sodass eine Bewertung und Aufzeichnung möglich werden. Ziel ist es, die ökonomische, ökologische und soziale Leistung der Maschine mit wenigen Kennzahlen umfänglich abzubilden. Durch die Kennzahlen werden Änderungen und Probleme erkannt, deren Ursache anschließend untersucht werden muss.

3.2.1 Kategorie B4: Prozessbewertung Energie

Die erste Kategorie beschäftigt sich mit dem „Energieverbrauch“ der Maschine im Betrieb und gibt Aufschluss über die Energieeffizienz. Verglichen wird im ersten Indikator der tatsächliche Energieverbrauch mit dem theoretischen Sollverbrauch. Mögliche Ursachen für eine Veränderung und Verluste sind beispielsweise: Druckluftleckage, Werkzeugverschleiß, Wärmeverluste, Prozessklimatisierung, Schmierstoffleckage oder Fehlbedienung [20]. Der zweite Indikator „Energienutzung“ betrachtet den Anteil der Energie, der für den wertschöpfenden Betrieb genutzt wird [17]. Dabei wird der Energieverbrauch im Betriebszustand „Produktion“ dem gesamten Energieverbrauch der Maschine gegenübergestellt. Mögliche Ursachen für eine Veränderung sind Wartungsintervalle, Prüfvorgänge, Maschinenbeschickung, Rüstvorgänge, Reinigungszeiten, An- und Ausschaltvorgänge oder Störungen. Der dritte und letzte Indikator „Energieverschwendungen“ ermittelt den Anteil an Energie, der für die Produktion der Auftragsmenge in Relation zur insgesamt produzierten Menge benötigt wird. Mögliche Unterschiede sind auf Qualitätsmängel, Fehlproduktion, Überproduktion oder eine reduzierte Geschwindigkeit zurückzuführen.

3.2.2 Kategorie B5: Produktionsmaterial

Der erste Indikator „Materialeffizienz“ der Kategorie Produktionsmaterial bildet die Abfallmenge des Produktionsmaterials ab, die während des Prozesses anfällt. Mögliche Veränderungen sind durch den Prozess selbst, das Material oder die Bedienung möglich.

Der zweite Indikator „Materialverschwendungen“ verhält sich ähnlich zur „Energieverschwendungen“. Dieser Indikator geht auf das Produktionsmaterial ein, das laut Materialeffizienz für eine gewisse Outputmenge notig ist, und gibt an, wie viel tatsächlich dafür verbraucht wurde. Abgedeckt werden somit alle Verluste durch Überproduktion, Fehlproduktion, Materialleckagen, Fehlbedienung oder Qualitätsmängel.

3.2.3 Kategorie B6: Hilfs- und Betriebsstoffe

Diese Kategorie bezieht sich auf die Aspekte des Kreislaufwirtschaftsgesetzes. Es gilt, Produkte so zu gestalten, dass bei deren Produktion die Menge der Abfälle vermindert werden [5]. Beide Indikatoren „Kühlmittelkreislauf“ und „Schmiermittelkreislauf“ beschreiben, inwieweit es sich um einen geschlossenen Kreislauf bei der Kühlung oder der Schmierung der Maschine handelt. Dabei wird das Kühl- und Schmierstoffvolumen über einen längeren Zeitraum beobachtet. Durch die Ermittlung des Anteils, der nach einem Durchlauf wieder zurückgeführt wird, können Kühlmittel-

degradation, Leckagen oder Nutzungsfehler festgestellt werden. Offene Kreisläufe werden negativ berücksichtigt. Typischerweise kann dieser Indikator für die Schmierung gewöhnlicher Lager und Gelenke vernachlässigt werden.

Der dritte Indikator „Hilfsstoffverbrauch“ betrachtet alle Materialien, die nicht unmittelbar für den Ablauf des Herstellungsprozesses nötig sind und doch für einen reibungslosen Ablauf genutzt werden. Die Zahl stellt die Masse an Hilfsstoffabfall zur insgesamt produzierten Endproduktmasse ins Verhältnis. Darin enthalten sind Putzmittel, Verpackungs- und Transportmittel oder Handhabungshilfen.

Der vierte Indikator „Wasserverbrauch“ bildet den Umgang mit der Ressource Wasser ab. Es wird die Wassermenge betrachtet, die nicht wieder zurückgeführt wird. Ursachen können Wasserverschmutzung, Verdampfen, Leckagen, oder ein fehlendes Rückfährsystem sein. Falls das Wasser ausschließlich zur Kühlung des Prozesses genutzt wird, entfällt der Indikator und wird stattdessen in Form des Indikators „Kühlmittelkreislauf“ integriert. Ähnlich wie bei der „Energie Nutzung“ wird als fünfter Indikator der Nutzungsanteil des wichtigsten Hilfsstoffs während des tatsächlichen Betriebs einbezogen. Sie gibt Aufschluss darüber, ob dieser Hilfsstoff nur während der wertschöpfenden Phase effizient verbraucht wird.

3.2.4 Kategorie B7: Sozial

Der soziale Indikator „Mitarbeitergesundheit“ zeigt anhand von Abwesenheitstagen der Belegschaft, wie sehr die Tätigkeit und die Arbeitsbedingungen gesundheitsbeeinträchtigend sind. Zusätzlich wird darüber die Mitarbeiterzufriedenheit festgestellt [22]. Indem Fehlzeiten der Maschinenbediener mit anderen Arbeitsstationen oder Abteilungen der Produktion verglichen werden, können Aussagen über Arbeitssicherheit, Arbeitsbedingungen, Personalbelastung und Mitarbeiterzufriedenheit getroffen werden.

Der zweite Indikator „Ergonomie“ bewertet die aus der Tätigkeit resultierende körperliche Belastung für Maschinenbediener. Sie wird in dieser Systematik durch das Vorgehen von *Hollmann et al.* bestimmt. [23, 24]

4 Validierung

Die Validierung der OES-Bewertungssystematik wurde in einem mittelständischen Unternehmen, das Bauprofile produziert, durchgeführt. Bei der betrachteten Maschine beziehungsweise Prozess handelt es sich um eine Extrusionsanlage zur Herstellung von Kunststoffprofilen aus Hart-PVC. Auf der Anlage werden unterschiedliche Produkte hergestellt, die sich neben den Abmessungen und verwendeten Primärmaterialien durch Zusatzmerkmale, wie zum Beispiel Co-Extrusion von Weich-PVC, differenzieren. Der Betrachtungszeitraum wurde auf eine Woche fixiert, was einer Gesamtdauer von 168 Stunden entspricht. Die Produktionszeit liegt, aufgrund des aktuellen Schichtmodells, bei 15 Schichten, also 120 Stunden.

Die prozessunabhängige Basisbewertung wurde in Form eines Fragebogens von Unternehmensverantwortlichen ausgefüllt. Um durch unterschiedliche Sichtweisen die Maschinenbasisbewertung zu berücksichtigen, wurde der Fragebogen interdisziplinär, funktions- und hierarchieübergreifend von Personen aus Geschäftsführung, technischer Leitung, Prozessoptimierung, und den Nach-

haltigkeitsbeauftragten gefüllt. Die Ergebnisse der Erhebung sind in **Bild 3** dargestellt.

Mit einem Gesamtwert von 72 % liegt die Maschine in der oberen Bewertungshälfte. Im Detail ergaben sich für die Maschine in der Benutzerfreundlichkeit und Arbeitssicherheit jeweils Werte von über 90 %. Im energetischen Bereich mit 43 % besteht Verbesserungspotenzial. Der Bereich der instandhaltungsgerechten Gestaltung fällt aufgrund einer fehlenden umfassenden technischen Dokumentation mit 60 % geringer aus als der Gesamtwert. Die kreislaufgerechte Gestaltung ist bis auf den Recyclinganteil der Maschine zufriedenstellend und auch bei der Wandlungsfähigkeit mit 73 % sowie dem Innovationsgrad der Maschine mit 82 % sind noch Verbesserungen möglich.

Die prozessabhängigen Indikatoren setzen sich aus den drei Faktoren der OEE sowie der ökologischen und sozialen Erweiterung, bestehend aus vier Faktoren mit insgesamt elf Indikatoren, zusammen. Die OEE der Maschine wird bereits seit einigen Jahren erhoben und beträgt für den Betrachtungszeitraum 85,7 %. Im Bereich des Faktors Energie ist die Maschine im Betrachtungszeitraum unauffällig. Beim Faktor Material ist momentan noch keine vollständige Datengrundlage verfügbar. Durch den Abgleich von eingesetztem Material und dem Material in den Endprodukten kann ein Materialverlust von circa 3 % ermittelt werden, was einen deutlichen Einfluss auf die Bewertung hat. Für den dritten Bereich der Hilfs- und Betriebsstoffe konnte bei der Maschine hauptsächlich der Wasserverbrauch als Kühlmittel identifiziert werden. Hier fällt der Wert mit 99 % hoch aus, da das Wasser, das nicht verdampft, wiederverwendet wird. Die restlichen Indikatoren in diesem Bereich hatten keine oder sehr kleinen Werte.

Zuletzt bleibt der soziale Bereich, bei welchem die Ergonomie des Arbeitsablaufs mit 82 % bewertet wurde. Die Krankheitstage unterschieden sich nicht vom restlichen Unternehmen, was zu einer Bewertung des Indikators mit 100 % führt. Insgesamt ergibt sich daraus ein Erweiterungswert von 83,3 %, der mit dem OEE-Wert verrechnet wird und zu einer prozessabhängigen Kennzahl von 71,2 % führt.

Trotz des kurzen Analysezeitraums von nur einer Woche konnten einige Nachhaltigkeitspotenziale identifiziert werden. In der prozessunabhängigen Dimension wurden Maßnahmen zur Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien identifiziert. Die Maßnahmen in der prozessabhängigen Dimension sind vielschichtiger. Im Bereich Material werden Möglichkeiten diskutiert, um den Materialverlust getrennt zu erfassen. Des Weiteren wird ein Forschungsprojekt zur Recyclierbarkeit des Materials initiiert. Ziel ist es, eine sortenreine Rückführung des Grundmaterials in den Prozess zu ermöglichen. Zur Absicherung der Verfügbarkeit der Anlage wird das Instandhaltungskonzept und die technische Dokumentation überarbeitet, mit dem Ziel einer störungsfreien Produktion.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Konzept der Overall Equipment Sustainability OES erlaubt es, die Nachhaltigkeit von Maschinen und Anlagen zu bewerten, zu vergleichen und zu optimieren. Durch den Aufbau der OES kann oft auf existierende Daten und Informationen, etwa aus der OEE-Berechnung, zurückgegriffen werden. Somit erhalten Produktionsverantwortliche mit überschaubarem Aufwand ein Werkzeug, um alle produktionsrelevanten Nachhaltig-

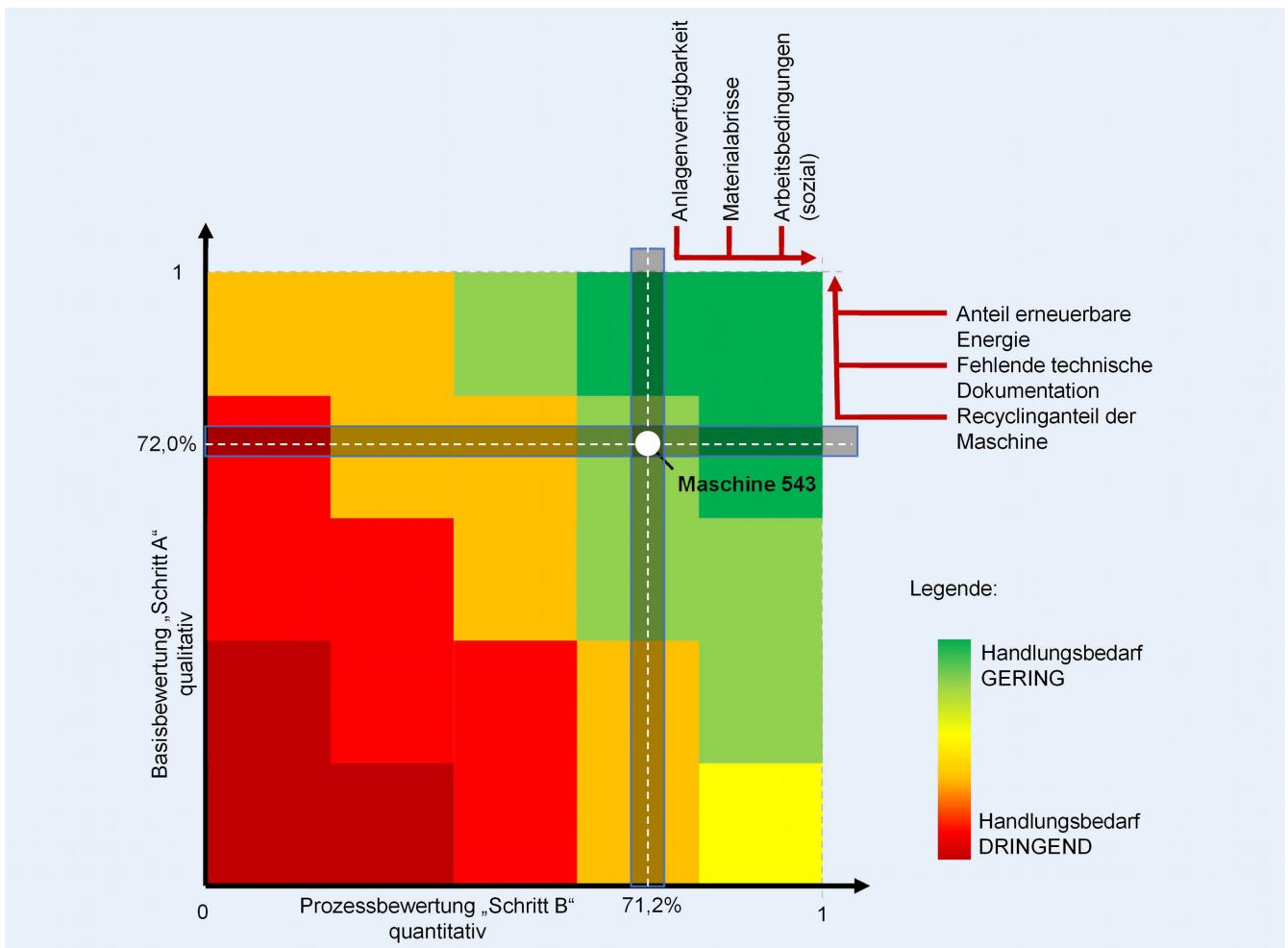


Bild 3. Ergebnis der Bewertung. Grafik: Fraunhofer IPA

keitsaspekte zu berücksichtigen. Validiert wurde die Bewertungsmethode und Kennzahl an einer Extrusionsanlage zur Herstellung von Kunststoffprofilen aus Hart-PVC. Bereits nach einem kurzen Analysezeitraum konnten hier Nachhaltigkeitspotenziale aufgedeckt werden. Die Dimensionen der OES erlauben den Einsatz des Indikators nicht nur im Produktionsbetrieb, sondern auch die Anwendung in der Konstruktions- und Beschaffungsphase. So kann die Methode zur Ermittlung der OES bereits vor einer Investitionsentscheidung als Checkliste zum Vergleich zweier Maschinen dienen, denn sie berücksichtigt wesentliche Aspekte einer nachhaltigen Maschine und ihre Schnittstellen mit der Produktionsumgebung.

Der Indikator OES soll zukünftig verstetigt werden. Neben der Validierung an weiteren Maschinentypen und Produktionsprozessen, steht eine automatisierte Berechnung und Visualisierung im Fokus. Somit sind vor allem in der prozessabhängigen Dimension Trendbeobachtungen und Controllingmechanismen sowie Erfolgswertungen von Nachhaltigkeitsoptimierungsmaßnahmen möglich. Neben einer partiellen Detaillierung des Indikators steht die Erarbeitung einer weiteren Dimension zur Bestimmung der absoluten Umweltwirkungen im Entwicklungsfokus. Dazu gehen die Forschungen hin zu einem vereinfachten Life-cycle Assessment der Produktionsmaschine, um aktuelle, negative Umwelteinflüsse als CO₂-Äquivalent zu berechnen und die Wirtschaftlichkeit von Verbesserungen zu garantieren.

L i t e r a t u r

- [1] Hingst, L.; Dér, A.; Herrmann, C. et al.: Towards a Holistic Life Cycle Costing and Assessment of Factories: Qualitative Modeling of Interdependencies in Factory Systems. *Sustainability* 15 (2023) 5, #4478
- [2] Moldavská, A.; Abreu-Peralta, J. V.: Learning Factories for the Operationalization of Sustainability Assessment Tools for Manufacturing: Bridging the Gap between Academia and Industry. *Procedia CIRP* 54 (2016), pp. 95–100
- [3] European Commission: Gerechte und nachhaltige Wirtschaft: Kommission legt Unternehmensregeln für Achtung der Menschenrechte und der Umwelt in globalen Wertschöpfungsketten fest. Stand: 23.02.2022. Internet: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_22_1145. Zugriff am 03.04.2025
- [4] Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Industrie-Investitionen in Klimaschutz binnen zehn Jahren um 74 % gestiegen. Stand: 28.11.2023. Internet: www.destatis.de/DE/Presse/Pressemeldungen/2023/11/PD23_N062_32.html. Zugriff am 27.03.2025
- [5] ifaa – Institut für angewandte Arbeitswissenschaft e. V.: Nachhaltigkeitsmanagement – Handbuch für die Unternehmenspraxis. Gestaltung und Umsetzung von Nachhaltigkeit in kleinen und mittleren Betrieben. Heidelberg: Springer Vieweg 2021
- [6] Chen, D.; Schudeleit, T.; Posselt, G. et al.: A State-of-the-art Review and Evaluation of Tools for Factory Sustainability Assessment. *Procedia CIRP* 9 (2013), pp. 85–90
- [7] Feng, C.; Huang, S.: The Analysis of Key Technologies for Sustainable Machine Tools Design. *Applied Sciences* 10 (2020) 3, #731
- [8] Züst, S.; Züst, R.; Schudeleit, T. et al.: Development and Application of an Eco-design Tool for Machine Tools. *Procedia CIRP* 48 (2016), pp. 431–436
- [9] Domingo, R.; Aguado, S.: Overall Environmental Equipment Effectiveness as a Metric of a Lean and Green Manufacturing System. *Sustainability* 7 (2015) 7, pp. 9031–9047

[10] Cercós, M. P.; Calvo, L. M.; Domingo, R.: An exploratory study on the relationship of Overall Equipment Effectiveness (OEE) variables and CO₂ emissions. *Procedia Manufacturing* 41 (2019), pp. 224–232

[11] Durán, O.; Capaldo, A.; Duran Acevedo, P.: Sustainable Overall Throughputability Effectiveness (S.O.T.E.) as a Metric for Production Systems. *Sustainability* 10 (2018) 2, p. 362

[12] Schlagenhauf, T.; Netzer, M.; Fleischer, J.: OEE+ : Ein Vorschlag zur zeitgemäßen Erweiterung der OEE um Nachhaltigkeitsaspekte. *wt Werkstattstechnik* 112 (2022) 7–8, S. 481–486. Internet: www.werkstatttechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien

[13] Garza-Reyes, J. A.: From measuring overall equipment effectiveness (OEE) to overall resource effectiveness (ORE). *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 21 (2015) 4, pp. 506–527

[14] Keller, F.; Schultz, C.; Simon, P. et al.: Integration and Interaction of Energy Flexible Manufacturing Systems within a Smart Grid. *Procedia CIRP* 61 (2017), pp. 416–421

[15] Dehli, M.: Abwärmenutzung in Industrie und Gewerbe. In: Dehli, M. (Hrsg.): *Energieeffizienz in Industrie, Dienstleistung und Gewerbe. Energietechnische Optimierungskonzepte für Unternehmen*. Heidelberg: Springer Vieweg 2020, S. 145–201

[16] Mert, G.; Bohr, C.; Waltemode, S. et al.: Increasing the Resource Efficiency of Machine Tools by Life Cycle Oriented Services. *Procedia CIRP* 15 (2014), pp. 176–181

[17] Winroth, M.; Almström, P.; Andersson, C.: Sustainable production indicators at factory level. *Journal of Manufacturing Technology Management* 27 (2016) 6, pp. 842–873

[18] Fechter, M.; Dietz, T.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems. *ARENA2036*. Heidelberg: Springer 2020

[19] Centoamore, P.; Pinto, L. F. R.: Remanufacturing Assessment of Machine Tools under a Circular Economy Perspective: A Resource Conservation Initiative. *Sustainability* 16 (2024) 8, p. 3109

[20] Schudeleit, T.; Züst, S.; Weiss, L. et al.: The Total Energy Efficiency Index for machine tools. *Energy* 102 (2016), pp. 682–693

[21] Hegab, H. A.; Darras, B.; Kishawy, H. A.: Towards sustainability assessment of machining processes. *Journal of Cleaner Production* 170 (2018), pp. 694–703

[22] Gottmann, J.: *Produktionscontrolling. Wertströme und Kosten optimieren*. Heidelberg: Springer Gabler 2019

[23] Faulkner, W.; Badurdeen, F.: Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. *Journal of Cleaner Production* 85 (2014), pp. 8–18

[24] Hollmann, S.; Klimmer, F.; Schmidt, K. H. et al.: Validation of a questionnaire for assessing physical work load. *Scandinavian journal of work, environment & health* 25 (1999) 2, pp. 105–114



Loïc Kulow
Tel. +49 711 / 970-1897
loic.kulow@ipa.fraunhofer.de
Foto: Autor

Dipl.-Ing. Thomas Adolf
thomas.adolf@ipa.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Dominik Lucke
dominik.lucke@reutlingen-university.de
Tel. +49 7121 / 271-5005

NXT Nachhaltigkeit und Technologie
Hochschule Reutlingen
Alteburgstr. 150, 72762 Reutlingen
www.nxt.reutlingen-university.de

Dr. Heiner Willerscheid
heiner.willerscheid@protektor.de

Protektorwerk Florenz Maisch GmbH & Co. KG
Viktoriastr. 58, 76571 Gaggenau
www2.protektor.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatzz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)