

Stabile Prozesse und überlegene Lösungen durch Werkstoffdaten in Wertschöpfungsketten

Material properties along value chains enable technical basis for robust processes and superior products

Neue Werkstoffe und effiziente Prozessketten sind die Grundlage für Innovationen. Klassische genormte Werkstoffbezeichnungen und zugehörige Werkstoffdaten stehen allerdings heute nur am Anfang von Entwicklungsprozessen. Im Zuge von Industrie 4.0 ist die Vernetzung von Wertschöpfungsketten gefordert. Der Weg zum Ziel beginnt mit der Nutzung von Werkstoffdatenbanken, führt über eine praxisorientierte Werkstoffsimulation mit Kopplungen zur Prozesssimulation bis hin zur systematischen Optimierung entlang der Prozessketten.

Udo Mathee

New materials and efficient process chains are enabler for innovation. For development processes material designations from standards and associated material data are a starting point only. Industry 4.0 means networking of value chains. A good start is the use of material databases and practical material simulation linked to process simulation. This can further be extended to a systematic optimization along process chains.



Foto: Fotolin

Die Beherrschung der Industrie-4.0-Wertschöpfungskette für hochfeste Stähle bedingt anspruchsvolle Werkstoffdaten
Control of Industry 4.0 value chains requires advanced material data

Die Möglichkeiten der Informationsbeschaffung über Werkstoffe sind vielfältig und in ständigem Wandel. Datenbanken, Fachbücher und Onlineangebote entwickeln sich weiter und führen letztendlich zu der vielzitierten Feststellung: Die Vermehrung von Informationen und Wissen ist keine Lösung, sondern ein neues Problem. Es kommt nicht darauf an, möglichst viele (inkonsistente) Werkstoffdaten im allgemeinen Zugriff zu haben, sondern die richtige Version der richtigen Daten beim Anwender im Unternehmen, der diese für seine aktuelle Problemlösung benötigt.

Die richtigen Informationen – Bereitstellung von Wissen im Unternehmen

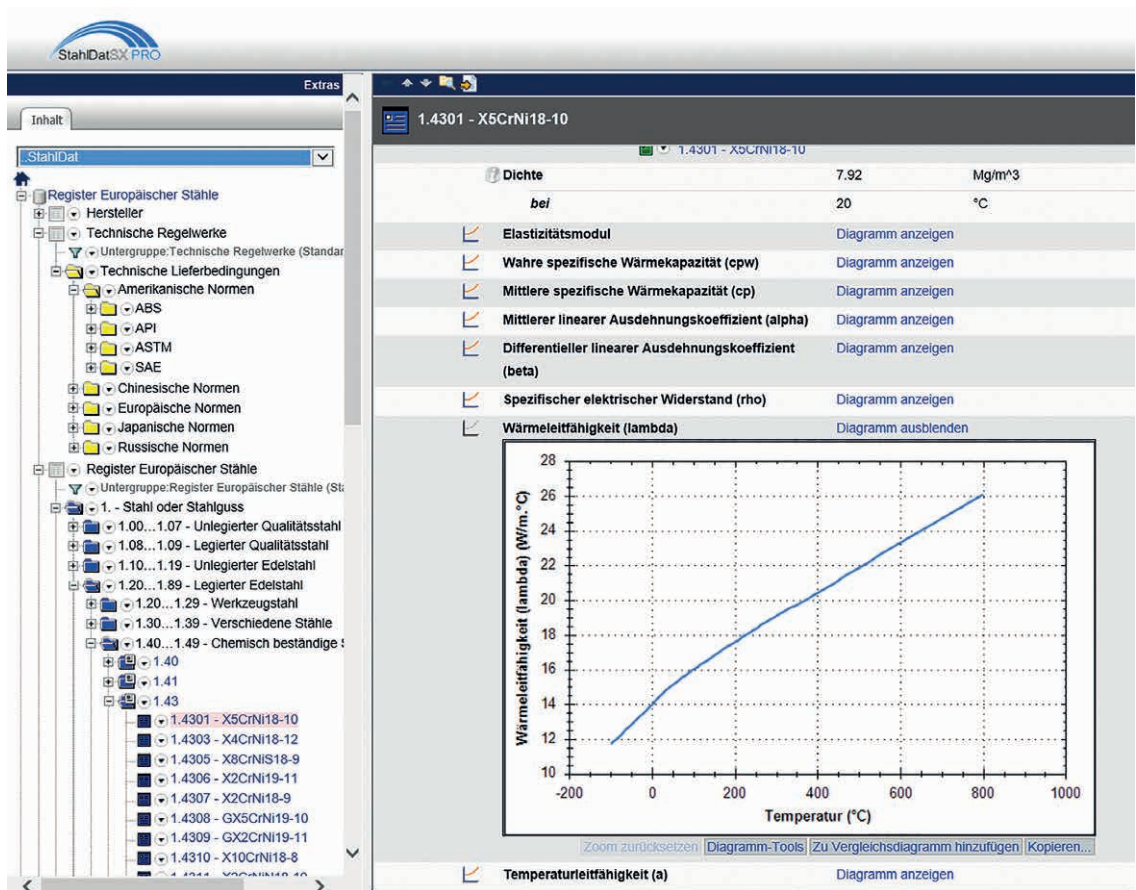
Für die industrielle Anwendung ist somit die systematische Nutzung des Werkstoffwissens in den Geschäftsprozessen für die Produkt- und Verfahrensentwicklung entscheidend. Im Zuge der allgemeinen Digitalisierung – Stichwort Industrie 4.0 – gewinnen dabei spezifische interne Wissensbasen in den Unternehmen zunehmend an Bedeutung. Nach der allgemein üblichen Einführung von ERP/PPS/MES und PLM folgt konsequent das Thema Werkstoffdatenmanagement.

- Entsprechende Lösungen beinhalten dabei:
 - ▷ Formal freigegebene Werkstoffdaten für die unterschiedlichen Fachdisziplinen: Konstruktion, Simulation, Fertigung, Beschaffung
 - ▷ Verweise auf Normen und ggf. eigene Liefervorschriften mit internationalen Umschlüsselungen
 - ▷ Verknüpfungen zu Werkstoffprüfungen intern/extern
 - ▷ Selektionskriterien für eine „optimale Werkstoffauswahl“
 - ▷ Schnittstellen zu den genutzten Systemen CAD/CAE/PLM.

Die Komplexität von Werkstoffdaten, die insbesondere jenseits von Normdaten für die Simulation der Prozesskette und Verarbeitungsschritte notwendig sind, wird oft unterschätzt. Analog zur Einführung von ERP-Systemen, die heute ausschließlich auf Basis von Standardsoftware implementiert werden, ist dieser Trend auch bei Werkstoffdatensystemen erkennbar. So konnten die vielfältigen Funktionen der Europäischen Stahl-Datenbank StahlDat SX, die seitens der Matplus GmbH im Auftrag des Stahlinstituts VDEh betrieben wird, wirtschaftlich nur durch die Nutzung eines Standardsystems realisiert werden:

- ▷ Daten aus Normen für alle ca. 2 400 europäischen Stähle mit Verknüpfungen zu Herstellern, Datenblättern und umfangreichen Abfragefunktionen

1 StahlDat SX – die im Internet verfügbare führende europäische Datenbank für Stahl kann der Startpunkt für den Aufbau einer webbasierten Inhouse-Lösung sein
 StahlDat SX – the leading European database of steels can be the starting point for creating a web-based in-house solution



▷ Technologische Daten wie parametrisierte Fließkurven, ZTU-Diagramme und thermophysikalische Daten

▷ Eine umfangreiche Volltextbibliothek mit Forschungsberichten, Stahl-Eisen-Blättern.

Bild 1 zeigt beispielhaft eine Auswertung von Zugversuchsdaten aus den bekannten Gemeinschaftsprojekten der Stahlindustrie mit der Automobilindustrie – mehrere 1 000 Werkstoffprüfungen sind im System dazu gespeichert.

Für die StahlDat SX wurde die Standardlösung Granta-MI verwendet. Sie gilt als weltweit führendes System auf diesem Gebiet und wird insbesondere in größeren Unternehmen eingesetzt. Für den Aufbau eines leistungsfähigen und standortübergreifenden Wissensmanagements auf dem Gebiet der Werkstoffdaten ist die StahlDat SX ein guter Startpunkt. Erweiterungen um eigene Daten können leicht vorgenommen werden, da bereits alle wesentlichen Strukturen, von parametrischen Fließkurven bis hin zu Volltextdokumenten, vorhanden sind.

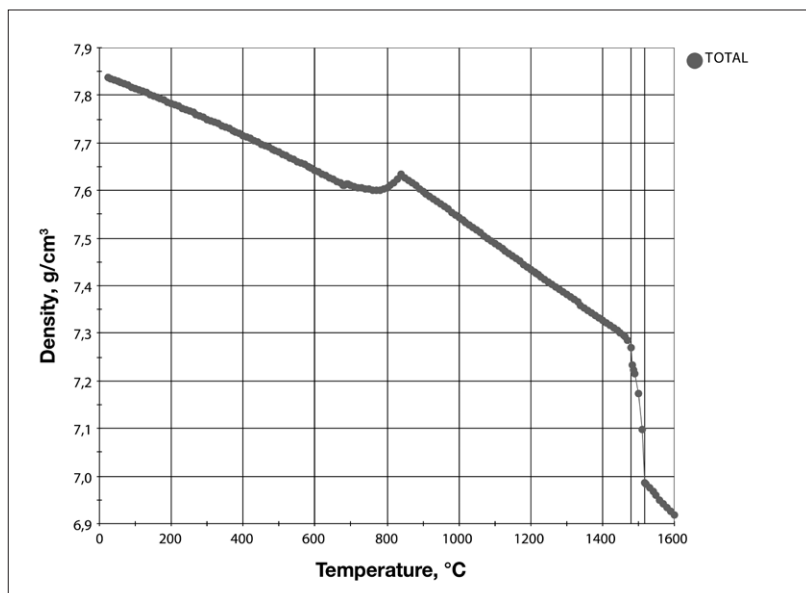
Unendliche Komplexität bei Werkstoffdaten

Genormte Werkstoffe lassen allgemein große Analysenspannen zu. Oft sind Mindestwerte, z. B. für die Festigkeit, angegeben. Allerdings führen die möglichen unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen zu deutlichen Streuungen bei anderen Werkstoffdaten, was für nachfolgende Produktionsschritte einen relevanten Einfluss auf die Fertigungssicherheit haben kann: Allein bei vollfaktorieller Variation der chemischen Zusammensetzung verbergen sich hinter einer Werkstoffbezeichnung tausende unterschiedlicher Legierungen und zusätzlich müssen unterschiedliche Fertigungswege betrachtet werden.

Einerseits geben die breiten Analysenspannen dem Hersteller die Freiheit, einen Stahl mit unterschiedlichen Zielsetzungen zu produzieren und die Analytik auf die eigene Herstellroute anzupassen. Dabei wird in der Regel an die Kosten gedacht, wobei die teuersten chemischen Elemente eher an das Minimum der Bereiche gelegt werden. Auch Korrosionseigenschaften, Festigkeit und Duktilität sind häufig Eigenschaften, die beeinflusst werden sollen. Offen bleibt allerdings oft die Frage, welchen Einfluss diese Modifikationen auf die anderen relevanten Eigenschaften und Prozessparameter haben.

Auf der anderen Seite können hierdurch beim Anwender Probleme entstehen, wenn sich in der Prozessfolge oder Anwendung dadurch Abweichungen und instabile Prozesse ergeben. Eine genaue Analyse ist erforderlich, die zu spezifischen technischen Lieferbedingungen zwischen Stahlhersteller und Anwender führen können – bis hin zu einer produktspezifischen Werkstoffentwicklung.

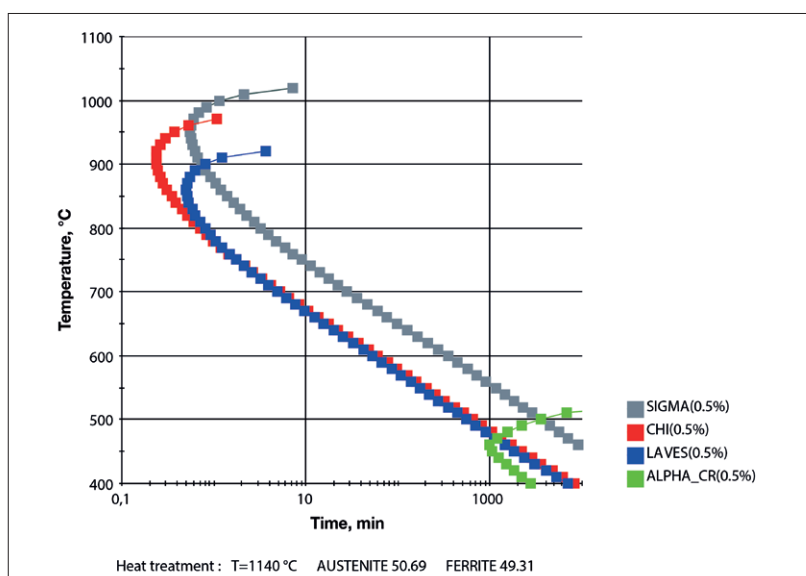
„Wer diese Zusammenhänge nicht kennt oder ignoriert, kann selbst beim Laserschweißen eines



2
Analysenspezifische Berechnung von thermophysikalischen Eigenschaften für einen hochfesten Baustahl mit JMatPro

Calculation of thermo-physical properties for a high-strength structural steel using JMatPro

vermeintlich einfachen S235 böse Überraschungen erleben. Allgemein ist hier von der Norm nur eine Obergrenze der Legierungsgehalte vorgesehen. Für das empfindliche Schmelzbad beim Strahlschweißen sind die vielen unterschiedlichen Werkstoffe, die sich hinter der Bezeichnung S235 verbergen können, schon ein Problem – vor allem, wenn der Stahl aus unterschiedlichen Chargen unterschiedlicher Her-



3
Berechnetes isothermes Ausscheidungsdiagramm für unerwünschte Sprödphasen eines Duplexstahls 1.4517 (GX2CrNiMoCuN25-6-3-3), gerechnet mit JMatPro
Calculated isothermic TTP (Time-Temperature-Precipitation) diagram phases for a selected Duplex grade 1.4517 (GX2CrNiMoCuN25-6-3-3)

steller stammt“, berichtet der Werkstoffexperte Uwe Diekmann, Geschäftsführer des Softwareanbieters Matplus GmbH in Kamen. Das Unternehmen ist im deutschsprachigen Raum ein Anbieter führender Lösungen auf den Gebieten Werkstoffsimulation, Werkstoffdatenmanagement und Wissensmanagement.

Doch zunächst muss noch auf ein grundsätzliches Problem aufmerksam gemacht werden: Physikalisch konsistente und temperaturabhängige Werkstoffeigenschaften sind oft kaum verfügbar, da eine experimentelle Ermittlung wegen der erforderlichen statistischen Absicherung sehr zeit- und kostenintensiv ist. Exakte Informationen, z. B. über die Wärmeleitfähigkeit, den E-Modul, über Ausdehnungskoeffizienten bei unterschiedlichen Umformgeschwindigkeiten und Temperaturen, werden jedoch als Eingangsparameter für weitere Produkt- und Prozessoptimierungen mit FEM-Methoden unbedingt benötigt. Im besten Fall wird von den Softwareherstellern ein Werkstoffdatensatz für einen Normwerkstoff mitgeliefert. In Anbetracht der tatsächlichen Analysenspannen und daraus folgenden uneinheitlichen Eigenschaften ist das jedoch bei weitem nicht ausreichend.

Analysengenaue Eigenschaften durch praktische Werkstoffsimulation

Gerade auf dem Gebiet der Werkstoffsimulation wird aktuell noch viel geforscht. Visionäre Konzepte einer Multi-Skalen-Simulation vom Atom zum Bauteil sind aber noch weit von der praktischen Einsetzbarkeit entfernt. Es gibt jedoch eine etablierte und bereits praktisch einsetzbare Werkstoffdatensimulation. Diese ist mittlerweile zu einem Schlüssel für eine

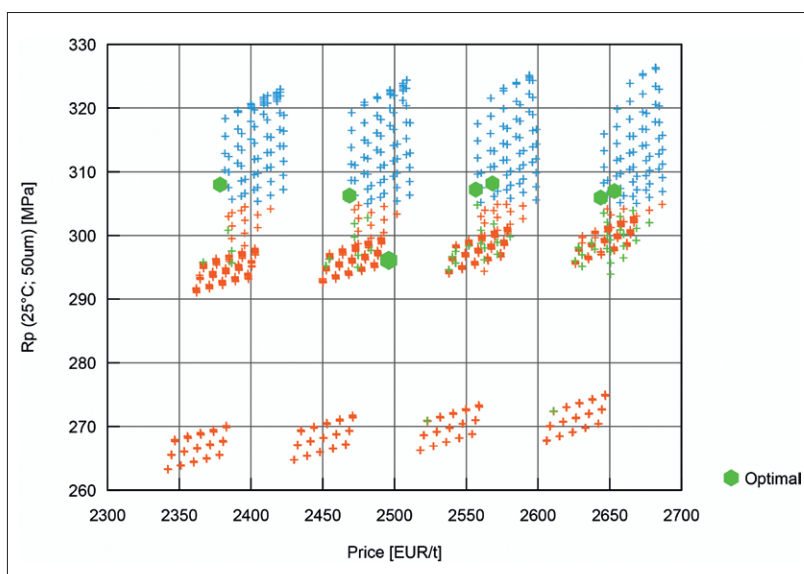
erfolgreiche Entwicklung ressourceneffizienter Produkte und optimierter Fertigungsprozesse geworden.

Die analysengenaue Berechnungen basieren dabei auf der Verwendung der wissenschaftlich etablierten CalPhaD-Methode (Calculation of Phase Diagrams) mit zugehöriger thermodynamischer Datenbank. Hierzu erfolgt die Ermittlung von Phasengleichgewichten für die einzelnen Legierungselemente. Die Gleichgewichte beschreiben z. B. die Stabilität bzw. das Lösungsverhalten der einzelnen Legierungselemente in Abhängigkeit der jeweiligen Temperatur. Dadurch geben sie die Basisinformationen für eine effektive Wärmebehandlung und der Abschätzung der jeweiligen Festigkeiten, sowohl bei Raumtemperatur als auch während der Umformung bei erhöhten Temperaturen.

Anwenderfreundliche Software hierzu steht Praktikern in Entwicklung, Qualitätsstellen, Konstruktion und Fertigung z. B. in Form des Werkstoffsimulationsystems JMatpro (Java-based Materials Properties) zur Verfügung. Diese Software wurde von Sente Software Ltd. in Großbritannien entwickelt und gilt heute als ein Industriestandard. Für die meisten marktüblichen FEM-Systeme können temperaturabhängige Daten wie in Bild 2 erzeugt werden – für gängige FEM-Systeme, wie z. B. Magmasoft, Simufact, Sysweld, Deform HT existieren automatisierte Schnittstellen, mit denen die nun konsistenten Datenmodelle direkt in die jeweiligen Systeme importiert werden können. Die Software ermittelt die wesentlichen benötigten Werkstoffeigenschaften für unterschiedliche Legierungsvarianten, sowohl für Stähle als auch andere Werkstoffgruppen. Eine Berechnung von ZTU- und ZTA-Diagrammen, Bild 3, sowie des Anlassverhaltens ermöglicht wiederum die Beschreibung der Gefügeentwicklung über den Herstellprozess bis hin zu Fließkurven für die Umformsimulation.

„Mit der Möglichkeit solcher Simulationen entwickelt sich ein umfassenderes Werkstoffverständnis – auch in der alltäglichen Praxis“, weiß Uwe Diekmann aus Erfahrung zu berichten. Die technischen Lieferbedingungen ließen sich dadurch präzise definieren, „wobei die zulässigen Normwertebereiche eingeschränkt und auch bestimmte Gefügestrukturen vom Stahlproduzenten gefordert werden können.“ All dies erhöht letztlich die Fertigungssicherheit.

Dabei steht die anwenderfreundliche Bereitstellung von Werkstoffdaten durch JMatPro für die FEM-Simulation, insbesondere für die Erstarrungs-, Umform- und Wärmebehandlungssimulation, im Vordergrund. Dem CAE-Anwender wird es einfach gemacht: Nach Eingabe der exakten chemischen Zusammensetzung aus einem Zeugnis für die Werkstoffcharge erhält er auf Knopfdruck seine spezifische „Materialkarte“ mit konsistenten thermophysikalischen Daten. Aufgrund all dieser Möglichkeiten wird die Software heute in vielfältiger Weise in Branchen wie Stahlindustrie, Anlagenbau, Automobil-, Gießerei- und Umformindustrie sowie in Forschung und Lehre eingesetzt.



4

Variation von Eigenschaften innerhalb einer Normbezeichnung für einen Duplexstahl

Variation of properties within the chemical compositions of a single DSS (Duplex stainless steel) designation

Wege zur systematischen Legierungsoptimierung

Die schon anfangs erwähnte Bandbreite der einzelnen Legierungselemente führt bei einer systematisch durchgeführten Variation der Legierungsanteile letztlich zu einer wahren Explosion der Kombinationen. Dies lässt sich beispielsweise an einem Duplexstahl (1.4517, GX2CrNiMoCuN25-6-3-3) zeigen, wobei hier lediglich die acht wichtigsten Legierungselemente betrachtet werden sollen. Selbst wenn nur das zulässige Minimum und Maximum und der daraus resultierende Mittelwert eines jeden Legierungsanteils berücksichtigt werden, führt das zu $3^8 = 6561$ Kombinationen. Für eine umfängliche Charakterisierung der möglichen Werkstoffeigenschaften und Gefügezusammensetzung reicht dieses Raster jedoch bei Weitem nicht aus. Dadurch wird deutlich, dass in umfangreichen Lösungsräumen die jeweils vorhandenen Optima nicht mehr manuell identifiziert werden können.

Diese Analyse der Lösungsräume übernimmt die datenbankgestützte Software EDA JM als Ergänzung zu JMatPro. EDA ist eine neuartige ICME (Integrated Computational Materials Environment)-Umgebung, die als webbasiertes System zunächst für die Verarbeitung von Massendaten aus JMatPro geschaffen wurde und mittlerweile auch mit Daten aus anderen Quellen arbeitet. Einzelne Optimierungen mit mehreren hundert bis hin zu mehreren tausend Variationsrechnungen erzeugen eine vergleichsweise große Datenmenge von mehreren Gigabyte, die strukturiert in der EDA-internen Datenbank auch für komplexe Auswertungen zur Verfügung stehen. Mit dem integrierten Optimierer können mehrdimensionale Zielkonflikte grafisch aufgelöst werden. Für den genannten Duplexstahl bestehen beispielsweise folgende Fragestellungen/Zielkonflikte:

- ▷ Die Duplextemperatur sollte deutlich oberhalb der Auflösung der Sigma-Phase, aber unterhalb von 1250 °C liegen.

- ▷ Die Umwandlungszeit für die Ausscheidung der Sigma-Phase sollte mehr als 2 min betragen, der PREN-Wert aber oberhalb 34 liegen.

- ▷ Weitere Restriktionen können sich auf Festigkeit als Funktion der Temperatur und Preis in Bezug auf den Legierungszuschlag beziehen.

Die Kriterien/Zielfunktionen sind in der Software frei definierbar und erweiterbar. Analysen, die die geforderten Kriterien erfüllen, werden zu Sets zusammengefasst, die auch in anderen Darstellungen kenntlich gemacht werden können. Dabei sind auch grafische Vergleiche solcher multipler Untersuchungen möglich. Durch eine Verknüpfung mit weiteren Selektionskriterien lässt sich schließlich die optimale Analyse entsprechend der Kriterien bestimmen. Damit kann ein großer Lösungsraum gezielt und systematisch untersucht werden, Bild 4. Die hier beschriebenen einzelnen Schritte können für einen Batch-Betrieb wiederholbar zusammengefasst werden, sodass die Berechnungen auch automatisiert durchgeführt werden können.

Insgesamt erweitert EDA die Möglichkeiten von JMatPro enorm – eine Variation der Zusammensetzung ist systematisch und vollfaktoriell praktisch machbar. Vorteile des Ansatzes liegen in der deutlichen Reduktion von experimentellen Aufwänden in Bezug auf Zeit und Geld sowie in der vergleichsweise einfachen Anwendung der Lösung. Darüber hinaus können auch die Variationsbreiten der thermophysikalischen Eigenschaften für die FEM-Simulationen berechnet werden, sodass rechnerische Analysen zur Stabilität von Prozessen möglich werden.

Zusammenfassend bilden die drei vorgestellten Lösungen ein solides Fundament für die Beschleunigung und Absicherung von Entwicklungsprojekten entlang der Wertschöpfungsketten für Stahl – und sind damit pragmatische Elemente von Industrie 4.0.

*Dipl.-Ing. Udo Mathee, Fach- und Wissenschaftsjournalist, Coesfeld.
mail@mathee.de*