

Einsatz des IMPOC-Verfahrens zur Bestimmung mechanisch-technologischer Eigenschaften von Stahlband

Thomas KEBE, Wilhelm DÜRR, Dmitri GOUREEV, Grit REIMANN
ThyssenKrupp Steel Europe AG, Kaiser-Wilhelm-Str. 100, 47166 Duisburg

Kurzfassung. Das IMPOC-Verfahren ist ein bei der ThyssenKrupp Steel Europe AG eingesetztes Verfahren zur Online-Ermittlung der mechanisch-technologischer Werkstoffeigenschaften. Hierbei wird das Stahlband mithilfe von stromdurchflossenen Spulen in regelmäßigen Abständen aufmagnetisiert und die magnetische Restfeldstärke der lokal erzeugten Magnetisierung, der sogenannte IMPOC-Wert, wird gemessen. Durch Gegenüberstellung des IMPOC-Wertes zu den zerstörend ermittelten Kennwerten Zugfestigkeit und Dehngrenze können nun mathematische Regressionsmodelle erstellt werden. Damit ist eine zerstörungsfreie Bestimmung der mechanisch-technologischer Eigenschaften über die gesamte Bandlänge möglich. Der Vortrag behandelt Grundlagen der zerstörungsfreien Werkstoffcharakterisierung, Vorstellung des IMPOC-Messsystems und Beispiele für die Anwendung des Systems. Darüberhinaus werden aktuelle Entwicklungsvorhaben vorgestellt.

1. Einführung

Das IMPOC-Verfahren hat sich bei der ThyssenKrupp Steel Europe AG (SE AG) zu einem Quasi-Standardverfahren für die zerstörungsfreie Online-Charakterisierung der mechanisch-technologischer Eigenschaften von Bandstahl etabliert. Insgesamt existieren bei SE AG vier IMPOC-Systeme, von denen drei an Feuerbeschichtungsanlagen und ein System an einer Contigluhe installiert ist. Hinzu kommen zwei weitere IMPOC-Systeme bei Tochterunternehmen der SE AG. Dieser Beitrag behandelt die Grundlagen der zerstörungsfreien Ermittlung der Materialeigenschaften und die Funktionsweise des IMPOC-Verfahrens. Weiterhin wird auf die Vorgehensweise zur quantitativen Ermittlung der mechanisch-technologischer Kennwerte auf Basis der Online-Messung eingegangen. Nach der Vorstellung der erreichbaren Genauigkeiten werden Anwendungen der Online-Messungen bei SE AG vorgestellt.

2.1 Zerstörende Prüfung der mechanisch-technologischer Werkstoffeigenschaften

Ein wichtiges Qualitätskriterium von Bandstahl sind die mechanisch-technologischer Eigenschaften, die den Einsatzbereich und die Auslegung der daraus gefertigten Komponenten festlegen. Je nach Anwendung gibt es spezifische Anforderungen an die Festigkeitseigenschaften, die vom Stahlproduzenten gegenüber dem Kunden garantiert werden müssen. Unter den diversen Werkstoffkennwerten behandelt dieser Beitrag die wichtigen Kennwerte Streckgrenze $R_{p0.2}$ und die Zugfestigkeit R_m . Die Ermittlung dieser

Kennwerte erfolgt in der Regel normgerecht nach DIN EN ISO 6892 [1], wobei spezielle Probenformen für Flachstahlerzeugnisse (Knochenproben) [2] verwendet werden. Die Prüfung erfolgt standardmäßig am Bandanfang und/oder –ende in Prüflaboren, wobei die ermittelten mechanischen Eigenschaften das gesamte, oft mehrere tausend Meter lange Stahlband repräsentieren. Allerdings werden die tatsächlichen mechanisch-technologischen Eigenschaften über die gesamte Bandlänge nicht gemessen. Hinzu kommt, dass nach der Probeentnahme für die zerstörende Prüfung bis zu 24 Stunden vergehen können, bevor das Prüfergebnis vorliegt. Mit Hilfe einer Online-Messung von R_{p02} und R_m liegen die Werte bereits direkt nach der Messung über der gesamten Bandlänge vor und können sogar für eine Prozessrückkopplung verwendet werden.

2.2 Grundlagen der zerstörungsfreien Werkstoffcharakterisierung

Reines Eisen hat sehr geringe Festigkeiten von nur ca. 100 MPa. Aber obwohl die meisten Stähle zu ca. 98% aus Eisen bestehen, können sie bei geeigneter Prozessführung Festigkeiten von mehr als 1000 MPa erreichen [3]. Diese Steigerungen können beispielsweise durch das Einbringen von Versetzung beim Kaltverformen, gezielte Hinzugabe von Legierungselementen zur Mischkristallverfestigung oder Kornfeinung durch entsprechende Temperaturführung hervorgerufen werden. Außerdem spielen auch Ausscheidungen und verschiedene Phasen in der Stahlmatrix eine wichtige Rolle. Alle genannten Mechanismen beeinflussen sowohl die mechanischen Eigenschaften, wie auch die physikalischen Eigenschaften des Stahls. Beim IMPOC-Verfahren werden die Korrelationen der mechanischen Eigenschaften mit den magnetischen Eigenschaften ausgenutzt.

2.3 Das IMPOC-Messsystem

IMPOC steht für **I**mpulse **M**agnetic **P**rocess **O**nline **C**ontroller. Das Verfahren wurde vom Institut für angewandte Physik der Akademie der Wissenschaften in Minsk, Weißrussland, entwickelt und für den Online-Einsatz ertüchtigt [4]. 2001 wurde das Verfahren erstmalig in einer Feuerbeschichtungsanlage bei der SE AG erprobt [5]. Während der letzten Jahre wurde das System von der Fa. EMG-Automation GmbH fortwährend weiterentwickelt, auf Digitaltechnik umgestellt und für Bandgeschwindigkeiten größer 300 m/min angepasst [6]. **Abbildung 1** zeigt ein Foto eines IMPOC-Messkopfes in einer Feuerbeschichtungsanlage. Der Messkopf besteht im Wesentlichen aus einer Induktionsspule, mit der durch einen gepulsten Stromfluss das vorbeilaufende Band lokal aufmagnetisiert wird und einem Sensor, der das magnetische Streufeld des magnetisierten Bandes erfasst. Der Abstand des Kopfes zum Band beträgt 25 mm. Unterhalb des Bandes befindet sich symmetrisch zum oberen Messkopf ein weiterer Messkopf (in **Abbildung 1** nicht sichtbar), so dass ein Spalt von insgesamt 50 mm zwischen den Messköpfen resultiert. Die Wicklungen der beiden Induktionsspulen sind gegenläufig und parallel geschaltet, so dass sich beim Aufmagnetisierungsvorgang die senkrechten Magnetfeldkomponenten kompensieren und in der Mitte der Messköpfe ein radiales Magnetfeld in der Bandebene entsteht. Nach der Magnetisierung läuft das Band unterhalb der Messsonden. Hierbei handelt es sich um Fluxgate-Magnetometer, welche in Gradiometeranordnung auf die Ableitung der senkrechten Magnetfeldkomponente H_z in senkrechter Richtung z sensitiv sind. Während der Bandbewegung ergibt sich ein zeitliches Messsignal, das eine Glockenform aufweist, von dem der maximale Wert gespeichert wird. Durch Mittelwertbildung der Signale beider Messköpfe erreicht man, dass das Messsignal weniger stark von Bandschwingungen um die Mittenposition der Messköpfe abhängig ist.



Abbildung 1: Foto eines IMPOC-Messkopfes in einer Feuerbeschichtungsanlage im Online-Messbetrieb.

Die Pulsfolgefrequenz wird durch die Bandgeschwindigkeit so geregelt, dass alle zwei Meter eine Messung erfolgt. Bei einer maximalen Pulsfolgefrequenz von 7,5 Hz sind so prinzipiell Messungen bei Bandgeschwindigkeiten von bis zu 900 m/min möglich.

Zur Visualisierung der magnetischen Feldstärkeverteilung einer mit dem IMPOC-System magnetisierten Probe wurde diese mit einem Feldstärkemessgerät vermessen. Als Probe diente ein mikrolegiertes Stahlblech von 1,0 mm Dicke und den Abmessungen 600 mm x 600 mm. Auf der Probe wurde ein Raster aufgebracht und in einem Abstand von 25 mm wurde die z-Komponente des magnetischen Streufeldes auf der Bandoberseite aufgezeichnet. Das Ergebnis der Messung zeigt **Abbildung 2** in zwei verschiedenen Darstellungen. Aus dem Konturplot (rechts) ist ersichtlich, dass die Magnetfeldverteilung oval verzerrt ist. Grund hierfür ist die ebenfalls ovale Wicklung der Induktionsspulen. Die rote gestrichelte Linie repräsentiert die relative Bewegungsrichtung der Messsonde. Hierbei ist der IMPOC-Messwert direkt proportional zum Maximum der z-Komponente der Magnetisierungsverteilung.

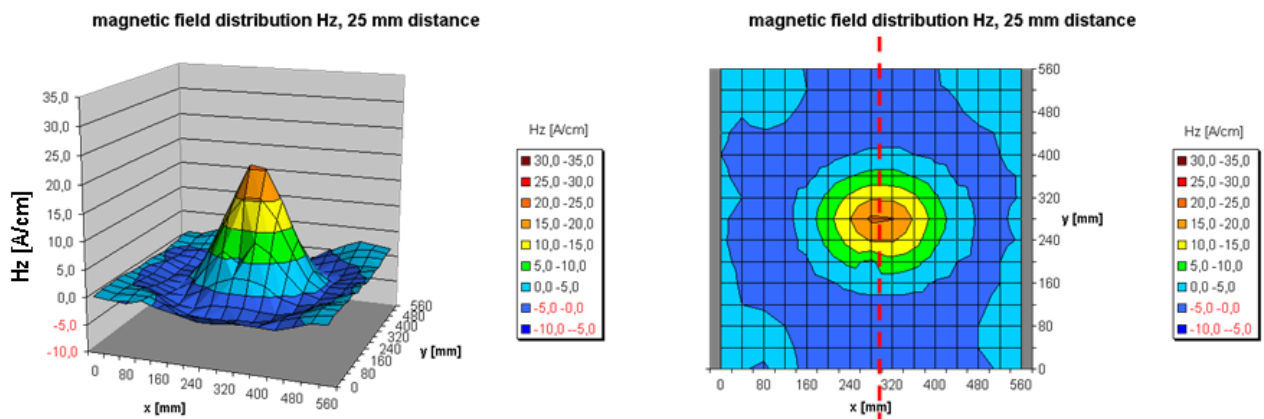


Abbildung 2: Verteilung der z-Komponente der magnetischen Streufeldverteilung nach Aufmagnetisierung mit IMPOC im Abstand von 25 mm.

2.3.1 Qualitative IMPOC-Messungen

Im Gegensatz zu anderen Online-Messsystemen zur Erfassung mechanisch-technologischer Werkstoffeigenschaften generiert IMPOC nur einen einzigen Messwert. Allerdings korreliert dieser Wert direkt mit den Festigkeitseigenschaften des Materials. Es gilt, je fester das Material, umso höher ist der IMPOC-Wert. Während weiche IF-Stähle Werte um ca. 3000 A/m² aufweisen steigt der Werte bei harten Dual-Phasen Stähle über 20000 A/m² an. In **Abbildung 3** ist der IMPOC-Verlauf von drei Bändern aus IF-Stahl verschiedener Festigkeitsklassen hintereinander dargestellt. Man sieht, dass man selbst ohne eine mathematische Modellbildung direkte Aussagen über die Festigkeitsabstufungen der Bänder treffen kann (hier: von höherfest nach weich). Zusätzlich kann man eine Bewertung über die Gleichmäßigkeit der Festigkeitseigenschaften über die Bandlänge direkt treffen.

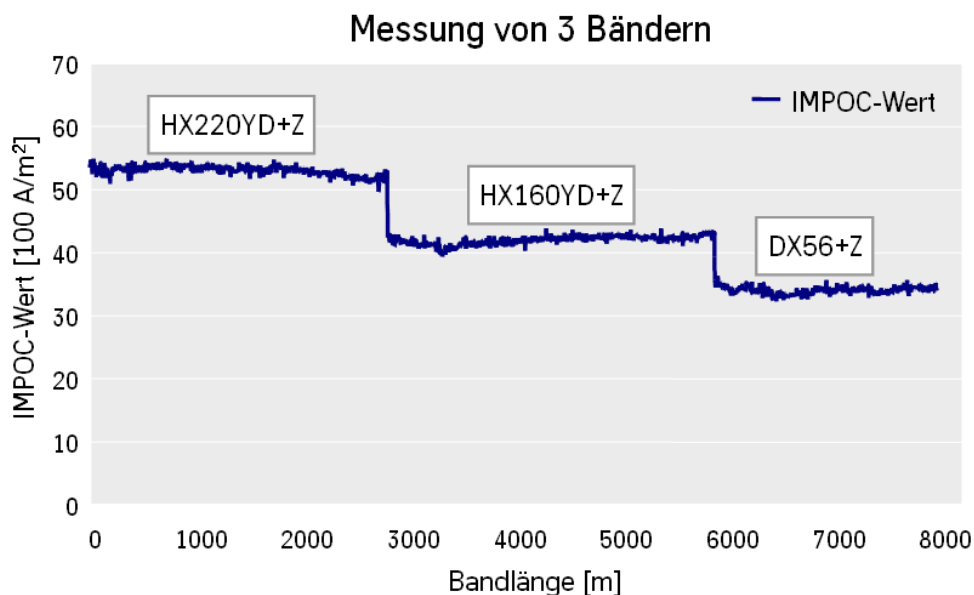


Abbildung 3: Verlauf des IMPOC-Wertes von drei IF-Stahlbändern verschiedener Festigkeiten.

2.3.2 Quantitative IMPOC-Messung

Für den Einsatz von Online-Messsystemen für Freigabeprozesse, genügt eine qualitative Beschreibung von Festigkeitseigenschaften über Bandlänge nicht. Hier sind vielmehr die absoluten Werte der Streckgrenze und Zugfestigkeit gefragt, die vom Kunden gefordert werden. Um dies zu erreichen, ist eine mathematische Modellierung notwendig, damit die gemessenen magnetischen Eigenschaften in mechanische Eigenschaften überführt werden können. Die hierfür benötigte Korrelationsanalyse wird mit einer multiplen linearen Regressionsrechnung durchgeführt:

$$R_x = a + b \cdot \text{IMPOC} + c \cdot \text{Dicke} + d \cdot \text{PP}_1 + \dots$$

wobei R_x für R_m oder R_{p02} steht und a , b , c und d Regressionskoeffizienten darstellen. Eingangswerte der Regressionsrechnung sind der IMPOC-Wert, die Dicke des Bandes, sowie weitere Prozessparameter (PP_n). Dies können beispielsweise Prozesstemperaturen, Umformgrade oder Gehalte an chemischen Elementen sein.

Werden Regressionsrechnungen für das gesamte Probenkollektiv aus verschiedenen Stählen durchgeführt, so ergibt sich ein Zusammenhang zwischen mit IMPOC errechneten und aus dem Zugversuch stammenden Zugfestigkeiten wie in **Abbildung 4 (links)** gezeigt. Während weiche interstitiell freie (IF) Stähle um die 45° Gerade streuen, gibt es bei den

Bake Hardening (BH)-Stählen, höherfesten IF-Stählen und mikrolegierten Stählen Parallelverschiebungen zur 45° Geraden von bis zu 20 MPa. Durch die geeignete Zusammenstellung zu sinnvollen Gütegruppen, für die einzeln Regressionsanalysen durchgeführt werden, lässt sich die Genauigkeit der Online-Messung erheblich steigern, wie in **Abbildung 4 (rechts)** gezeigt. Beispielsweise erreicht man Reststreuungen¹ für IF Stähle von ca. 5 MPa, d.h. innerhalb des Intervalls von 2σ , bzw. ± 10 MPa um den Wert des Zugversuchs liegen 95% der berechneten Werte. Das Ergebnis dieser Analyse für die Modellierung der Streckgrenze zeigt **Abbildung 5**. Hier werden Genauigkeiten von ± 12 MPa (für 95% der Werte) erreicht. Wie man aus dem Beispiel sieht ist es wichtig, dass man ähnliche Stahlgüten zu sinnvollen Gruppen zusammenfasst, wobei ein Kompromiss zwischen der Anzahl der erstellten Gütegruppen (erhöhter Aufwand) und der erzielbaren Genauigkeiten getroffen werden muss.

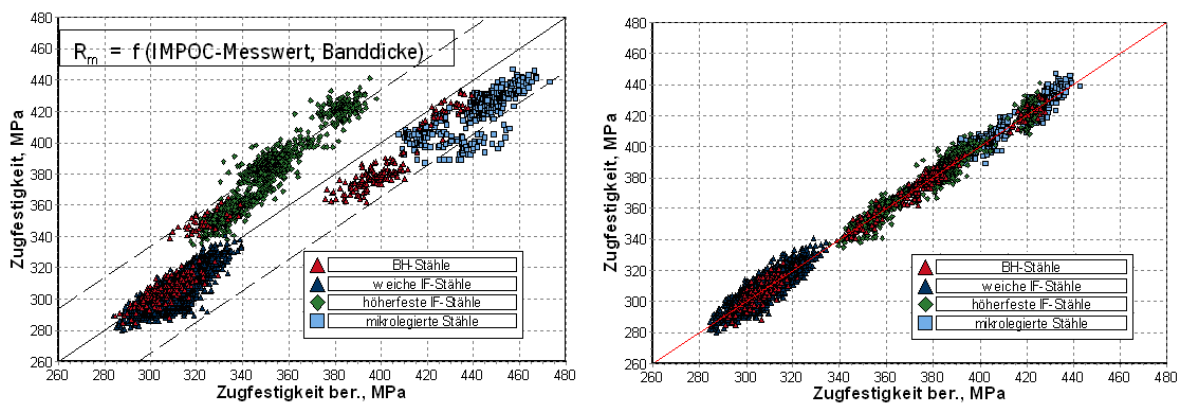


Abbildung 4: Gegenüberstellung der mit IMPOC berechneten und mit Zugversuch ermittelten Zugfestigkeit. (links) Korrelationsergebnis der Regressionsrechnung mit nur einem Parametersatz, (rechts) Regression für verschiedene Gütegruppe separat erstellt.

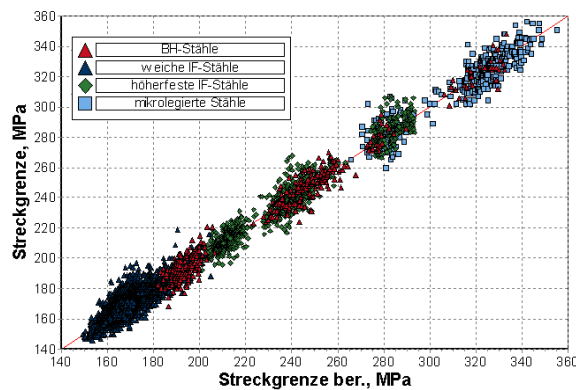


Abbildung 5: Gegenüberstellung der mit IMPOC berechneten und mit Zugversuch ermittelten Streckgrenze für verschiedene Gütegruppe separat erstellt.

¹ Standardabweichung der Differenz aus Mittelwert und Einzelwert

3. Anwendungsbeispiele des IMPOC-Messsystems bei ThyssenKrupp Steel Europe

Die Messungen des IMPOC-Systems werden häufig zur Optimierung der Rückschnittspraxis bei Bändern eingesetzt, die streckenweise nicht die vom Kunden geforderten Festigkeitseigenschaften aufweisen. Dies ist am Beispiel eines weichen IF-Stahls der Bestellgüte DX52D+Z in **Abbildung 6** gezeigt. Es handelt sich um ein Stahlband aus einer Anfahrbamme. Dies ist die erste Bamme, die nach einem Anlagestillstand oder Analysenwechsel beim Stranggussverfahren produziert wird. In der Regel wird der erste Bandabschnitt einer solchen Bamme abgeschnitten und verschrottet, wobei die Abschnittslänge auf Erfahrungswerten beruht. Zur Untersuchung der Auswirkung auf die Streckgrenze wurde das Coil aus der Anfahrbamme schrittweise zurückgeschnitten. Am Bandanfang kommt es in diesem Beispiel zu einer deutlichen Überschreitung der vom Kunden geforderten Dehngrenze (Toleranzband: rote gestrichelte Linien). Nach jedem Rückschnitt wurde die Streckgrenze durch Zugversuch ermittelt. Erst nach dem vierten Bearbeitungsvorgang liegt die Streckgrenze im Bereich der Kundenforderung. Betrachtet man hingegen den Verlauf des IMPOC-Wertes über Bandlänge, so hätte der Rückschnitt in einem Schritt bei ca. 500 m erfolgen können. Durch den Einsatz der Online-Messung lässt sich somit die Nacharbeit reduzieren, die Ausbringung erhöhen und der Freigabeprozess beschleunigen. Für die Optimierung der Rückschnittspraxis ist eine Umrechnung des IMPOC-Wertes in beispielsweise Streckgrenze nicht notwendig, weil bereits aus dem qualitativen Verlauf der IMPOC-Kurve auffällige Bandabschnitte identifiziert und beseitigt werden können.

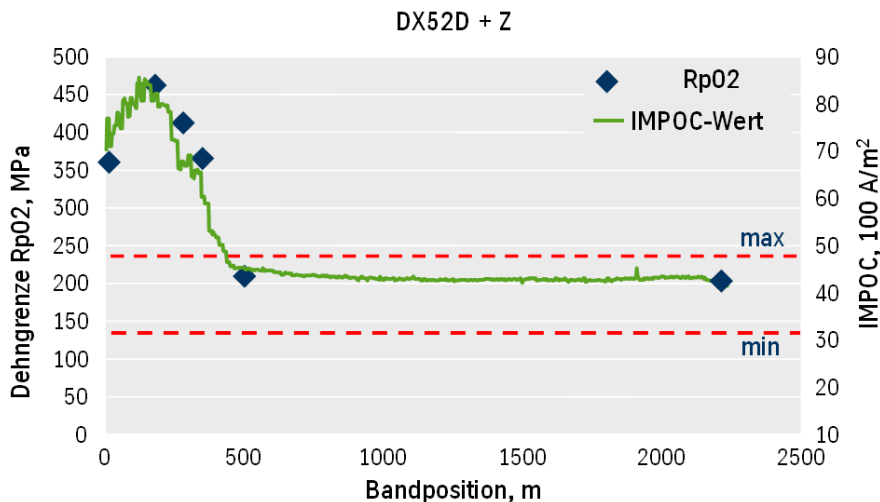


Abbildung 6: Verlauf der Dehngrenze über Bandlänge am Beispiel eines weichen IF-Stahls aus einer Anfahrbamme.

Eine zukünftige Anwendung für die Online-Messung der Materialeigenschaften ist die automatische Freigabe von Stahlbändern. Dies soll am Beispiel eines weichen IF-Stahls erläutert werden. **Abbildung 7** zeigt eine Zusammenstellung der Streckgrenze von Bändern einer weichen IF-Güte, die über einen Zeitraum von ca. 6 Monaten bei ThyssenKrupp Steel Europe in einer Feuerbeschichtungsanlage produziert wurden. Dargestellt sind sowohl die Streckgrenzen aus dem Zugversuch, sowie die mithilfe des IMPOC-Systems berechneten Werte an der jeweils gleichen Bandposition. Die rote Linie begrenzt das Toleranzintervall des Kunden (USL: upper specification limit, LSL: lower specification limit), wobei sich die Werte leicht unterhalb der oberen Kundentoleranz befinden. In einigen Fällen kommt es bereits bei den zerstörend geprüften Proben zu einer Überschreitung des Grenzwertes, so dass die entsprechenden Bänder gesperrt werden. Möchte man nun die Online-Messung für den Freigabeprozess einsetzen, so muss man die Unsicherheit mit der die Online-

Vorhersage behaftet ist hierbei mit berücksichtigen. Da die Genauigkeit für die Streckgrenze bei den weichen IF-Stählen bei ± 12 MPa liegt, sollte die Freigabegrenze der berechneten Werte aus IMPOC-Messung um 12 MPa tiefer liegen als die obere Kundengrenze. Diejenigen Bänder bei denen der errechnete Streckgrenzenwert unterhalb der maximalen IMPOC-Freigabegrenze liegt können dann sofort freigegeben werden. Bei Überschreitung muss zur Konformitätsprüfung ein Zugversuch im Prüflabor durchgeführt werden. In dem hier gezeigten Beispiel ließen sich auf diesem Wege mehr als 60% der Zugversuchsproben einsparen, und die Freigabe könnte sofort ohne Zeitverzug durch Laborprüfungen erfolgen.

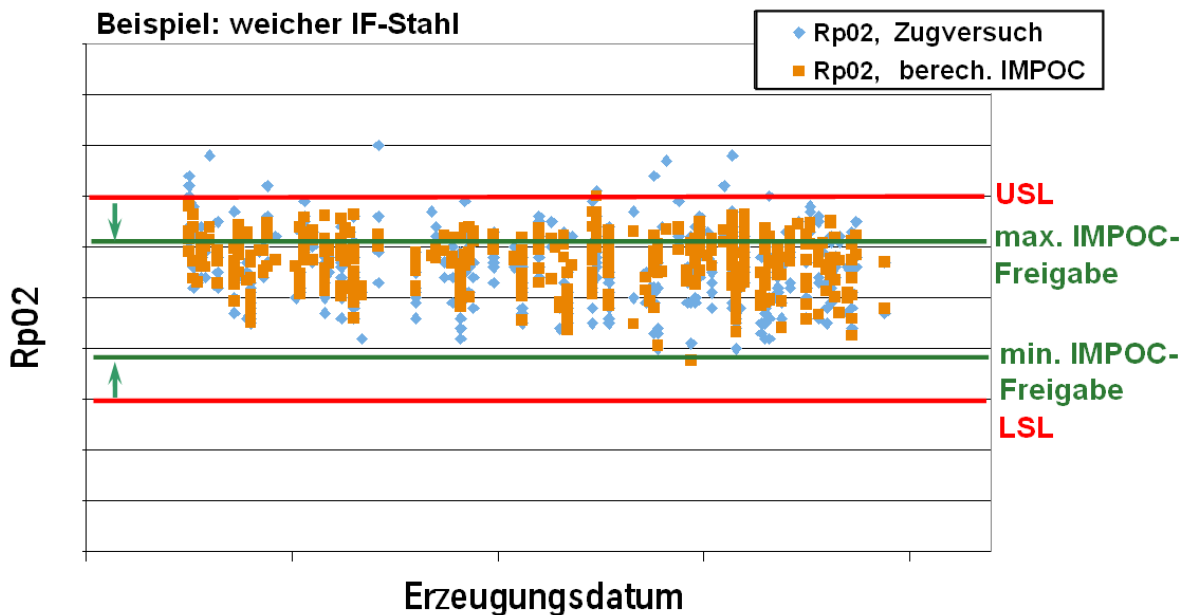


Abbildung 7: Berechnete und gemessene Streckgrenzen von weichen IF-Stählen, die über einen Zeitraum von ca. 6 Monaten bei der SE AG produziert wurden.

4. Zusammenfassung

Das IMPOC-Verfahren basiert auf der lokalen Magnetisierung eines ferromagnetischen Stahlbandes und der nachfolgenden Messung der remanenten Restfeldstärke. Die gute Korrelation des erzeugten Messwertes mit Materialfestigkeiten, sowie der im Gegensatz zu anderen Online-Verfahren zur Materialcharakterisierung relativ große Arbeitsabstand in Höhe von 25 mm trugen wesentlich zu der Entscheidung für die Auswahl des IMPOC-Verfahrens bei ThyssenKrupp Steel Europe bei. Bereits ohne die Erstellung von mathematischen Modellen kann man Aussagen über die Gleichmäßigkeit von Festigkeitseigenschaften treffen. Für eine Umrechnung der online gewonnenen Messwerte in Zugfestigkeit und Streckgrenze ist allerdings eine mathematische Modellierung notwendig. Hierbei kommt die multiple lineare Regression zum Einsatz. Werden bei der Regressionsanalyse verschiedene Stahlgüten zu sinnvollen Gruppen zusammengefasst, so lässt sich ein guter Kompromiss finden zwischen Aufwand zur Modellerstellung einerseits und Genauigkeit der Vorhersage andererseits. Beispielsweise lassen sich bei weichen IF-Stählen für die Zugfestigkeit Genauigkeiten von ± 10 MPa erreichen bzw. ± 12 MPa für die Streckgrenze. Anwendung findet das IMPOC-Verfahren z. B. bei der Optimierung der Rückschnittspraxis, bei der Bandabschnitte mit abweichenden mechanischen Eigenschaften metergenau abgeschnitten werden. Zukünftig ist auch an eine automatische Freigabe von bestimmten Güten denkbar. Hierbei muss durch geeignete Wahl der Freigabegrenzen die

Unsicherheit bei der Online-Bestimmung der mechanisch-technologischen Eigenschaften
Berücksichtigung finden.

Referenzen

- [1] DIN EN ISO 6892-1: 2009 Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur
- [2] DIN 50125 Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben
- [3] R. W. K. Honeycombe, *Monografie "Steels: Microstructure and Properties"*, Asm Intl (December 1981)
- [4] V. F. Matyuk, M. N. Delendikh, A. A. Osipov, D. A. Pinchukov, H. Hartmann, H. Reichelt, R. Schmidt, ECNDT 2006 – Th.3.7.5
- [5] W. Dürr, M. Irle, *Stahl und Eisen* 123, Nr. 10, S. 73 (2003)
- [6] K. Herrmann, M. Irle, *Flat Rolled Steel Processes: Advanced Technologies*, S. 265 ff, CRC Press (2009).