

Laserschneiden von Batteriefolien mit gepulsten Lasersystemen

M. Sailer^a, A. Fehrenbacher^a, Malte Kumkar^a, Adam Rosowski^b, Jack Gabzdyl^b

^aTRUMPF Laser GmbH, Schramberg, Deutschland

^bTRUMPF Laser UK Ltd, Southampton, United Kingdom

Die Nachfrage und Innovation bei der Batterieherstellung steigt zunehmend mit dem wachsenden Bedarf an e-Mobilität. Da mechanische Verfahren bei der Produktion von Batteriezellen oft an ihre Grenzen stoßen, kann der Laser als präzises kontaktloses Werkzeug viele Vorteile bieten gegenüber klassischen mechanischen Bearbeitungsverfahren. Die Wahl der passenden Laser-Technologie gestaltet sich jedoch aufgrund der Komplexität der Folienmaterialien und Elektrodenzusammensetzungen als herausfordernd. Während das Schneiden mit kontinuierlichen Lasern oft zu großen Wärmeeinflusszonen führt, insbesondere bei beschichteten Folien, sind gepulste Laser in der Lage, in der Regel eine bessere Qualität beim Schneiden zu erzielen. Der Beitrag gibt einen Überblick über die Herausforderungen des Laser-Schneidens von Batteriefolien und untersucht die Vor- und Nachteile von Nanosekunden- und Pikosekunden-Lasern für eine Vielzahl von verschiedenen Materialien.

1. Einleitung

Die Herstellung von leistungsfähigen Batterien ist ein entscheidender Bestandteil vieler moderner Technologiezweige. Anwendung finden Batterien vor allem in Bereichen wie tragbarer Elektronik, Elektrofahrzeugen und erneuerbarer Energiespeicherung. Der Wunsch, die globale Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu reduzieren, fördert die E-Mobilität und damit auch die Batterietechnologie. Lithium-Ionen-Batterien sind hierbei derzeit meist die bevorzugte Technologie für die Elektrifizierung des Verkehrs.

Ein wesentlicher Aspekt der Batterieproduktion sind Batteriefolien, die insbesondere in Lithium-Ionen-Batterien von zentraler Bedeutung sind. Es gibt hierbei zwei Haupttypen von Batteriefolien: Anoden- und Kathodenfolien. Anodenfolien sind die negative Elektrode einer Batterie und für die Aufnahme von Elektronen beim Entladen verantwortlich. Sie bestehen typischerweise aus einer dünnen Kupferfolie im Dickenbereich von 6–10 µm, die mit einer doppelseitigen Graphitschicht beschichtet ist, welche 30–80 µm dick sein kann, was eine Gesamtfoliendicke von bis zu ~0,2 mm ergibt (Abbildung 1, rechts). Kathodenfolien hingegen stellen die positive Elektrode einer Batterie dar und sind für die Abgabe von Elektronen beim Laden verantwortlich. Sie bestehen typischerweise aus einer dünnen Aluminiumfolie im Bereich von 10–15 µm, die mit einem doppelseitigen aktiven Medium auf Lithiumbasis beschichtet ist, das 60–100 µm dick sein kann, was zu einer Gesamtfoliendicke von bis zu 0,2 mm führt (Abbildung 1, links). Die genaue Chemie der Zellen entwickelt sich ständig weiter, aber abhängig von den gewünschten Eigenschaften der Batterie werden sie typischerweise aus Materialien wie Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA), Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC) oder Lithiumeisenphosphat (LFP) hergestellt. Ein sehr auffälliger Trend der letzten Jahre war der Übergang zu immer dünneren Metallelementen, die

dazu beitragen, das Gewicht und die Kosten der Batterien von morgen zu reduzieren [1-3].

Nach der Beschichtung der dünnen blanken Metallfolien mit den aktiven Schichten müssen die beschichteten Folien, die auf breiten Rollen produziert werden, je nach herzustellendem Zellformat in Form geschnitten werden. Typischerweise gibt es hierbei mehrere Schneidforderungen, vom einfachen geradlinigen Schlitzten über das Ausklinken, wo Laschen in das unbeschichtete Element der Folien geschnitten werden, bis hin zum vollständigen Schneiden von Elektroden, bei dem der Schneidprozess sowohl beschichtete als auch unbeschichtete Bereiche schneiden muss.

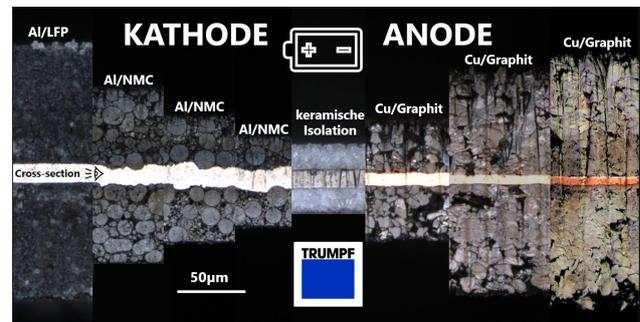


Abbildung 1: Übersicht verschiedener Batteriefolien im Querschnitt. Je nach Anforderung an die Batterie kommen verschiedene Schichtsysteme zum Einsatz in unterschiedlichen Dicken.

Traditionell werden diese Folien und Elektroden oft mechanisch mit unterschiedlichen Werkzeugen geschnitten. Diese erfordern jedoch oft einen erheblichen Wartungsaufwand, um die Anforderungen an die Kantenqualität sicherzustellen. Aufgrund dieser Einschränkungen mechanischer Schneidmethoden wird das Laserschneiden zunehmend zum Trennen von Batteriefolien eingesetzt, da es berührungslose, präzise und genaue Schnitte mit minimalem bis gar keinem Wartungsaufwand ermöglicht.

Hierbei gibt es mehrere Lasertypen, die üblicherweise zum Schneiden von Batteriefolien verwendet werden und mechanische Methoden in aktuellen kommerziellen Anlagen zunehmend ersetzen [4,5].

Neben CW-Lasern sind vor allem gepulste Laser für das Folienschneiden prädestiniert, da sie Vorteile bei der Schnittqualität bieten, insbesondere im Hinblick auf die erzeugten Wärmeeinflusszonen (HAZ), die die Folie beschädigen könnten oder für die korrekte Funktion des Batteriestacks nach der Montage entscheidend sind.

Bei gepulsten Lasern gibt es wiederum zwei Haupttypen von Lasern, die üblicherweise zum Schneiden von Batteriefolien verwendet werden: Nanosekundenlaser und ultrakurz gepulste Laser (UKP-Laser). Beide Lasertypen haben für diese Anwendung ihre eigenen Vorteile und Einschränkungen, und die Wahl des Lasers hängt von den spezifischen Anforderungen des Schneidprozesses ab.

Nanosekundenlaser sind Laser, die Pulse mit einer Dauer von wenigen Nanosekunden bis zu mehreren hundert Nanosekunden aussenden. Aufgrund ihrer hohen Leistung und guten Strahlqualität werden diese Laser häufig für eine Vielzahl von Schneid- und Bearbeitungsanwendungen eingesetzt. Beim Batteriefolienschneiden können ns-Laser hohe Schnittgeschwindigkeiten und eine gute Kantenqualität liefern [6], weisen jedoch je nach Material möglicherweise eine geringere Schneideffizienz auf, was zu einer höheren Wärmeentwicklung im Vergleich zu Ultrakurzpulslasern führen kann.

Ultrakurzpulslaser sind Laser, die Pulse mit einer Dauer von mehreren hundert Femtosekunden bis zu mehreren zehn Pikosekunden aussenden. Diese Laser zeichnen sich durch eine hohe Spitzenleistung und eher moderate Pulsenergie aus. Beim Batteriefolienschneiden können UKP-Laser je nach Material eine verbesserte Effizienz und damit verbunden eine geringere Wärmeentwicklung bieten, was zu einer geringeren Materialverformung und -schädigung führt. Jedoch können je nach Material auch geringere Schnittgeschwindigkeiten beobachtet werden als bei vergleichbaren ns-Systemen.

Aufgrund der fortschreitenden Materialentwicklung sowie der Erweiterung der verfügbaren Laserparameter für kurz- und ultrakurz gepulste Laserquellen stehen Batteriehersteller häufig vor der Herausforderung, die am besten geeigneten Laserquellen für ihre spezifischen Schneidanforderungen zu finden.

2. Setup

Zur Bewertung von Geschwindigkeits- und Qualitätsaspekten beim Batteriefolienschneiden wurden mehrere TRUMPF Laserquellen eingesetzt, die alle relevanten zeitlichen Emissionsparameter wie verschiedene Pulsdauern und Pulsrepetitionraten bei höchsten Strahlqualitäten abdecken können. Kombiniert mit durchschnittlichen Leistungen von mehreren Hundert Watt

lässt sich eine hohe Produktivität bei optimaler Schnittqualität erzielen.

Die Größe des Spotdurchmessers ist oft ein entscheidender Faktor für die Bestimmung der Schnittgeschwindigkeit und der Kantenqualität. Je kleiner die Spotgröße, desto schneller ist die Schnittgeschwindigkeit und desto kleiner ist die Wärmeeinflusszone. Aus praktischer Sicht ist jedoch ein angemessener Arbeitsabstand, Scanfeldgröße und Schärfentiefe erforderlich, was die Verwendung von Objektiven mit sehr kurzer Brennweite wiederum einschränkt. Aufgrund des erheblichen Einflusses der Spotgröße wurde sichergestellt, dass alle getesteten Laserquellen und verwendeten Optiken zu vergleichbaren Spotgrößen von $2w_0 \approx 32\text{--}34 \mu\text{m}$ ($1/e^2$) führten.

2.1. ns gepulste Faserlaser

Für die Untersuchung des ns-Regimes wurden TRUMPFs industrielle Faserlaser TruPulse nano verwendet. Diese Laser arbeiten bei 1064 nm und das MOPA-Design (Master Oscillator Power Amplifier) bietet Benutzern eine beispiellose Möglichkeit, die zeitlichen Pulseigenschaften abzustimmen, um Schneideffizienz und Qualität zu optimieren. Die Pulsdauer kann im Bereich von 2–2.000 ns variiert und der Laser bei Frequenzen bis zu 4 MHz betrieben werden.



Abbildung 2: Der ns-Faserlaser TruPulse nano 2060 kann durch seine flexiblen Pulsparameter und eine mittlere Leistung von 600W sowohl qualitative Herausforderungen bewältigen als auch sehr produktiv diverse Batteriefolien schneiden.

Die Abstimmung der Pulsfrequenz des Lasers auf ein konstantes Leistungsniveau ist ein Schlüssel für optimale Schneidergebnisse, da die höchste Schneideffizienz oft nicht mit der höchsten verfügbaren Pulsenergie oder Spitzenleistung verbunden ist. Neben hohen Repräsentationsraten erfordern Schneidanwendungen oft eine hohe Durchschnittsleistung in Kombination mit einer guten Strahlqualität, üblicherweise verwendete Quellen haben je nach Anwendung eine Leistung im Bereich von 100–600 W mit einer Strahlqualität von $M^2 < 1,6$. Die Pulsenergie und die Spitzenleistung des TruPulse nano hängt von der Pulsdauer und der Betriebsfrequenz ab.

Gepulste ns-Faserlaser wie der TruPulse nano von TRUMPF eignen sich durch ihre hohe Zuverlässigkeit und Flexibilität hervorragend für Schneidanwendungen,

verdrängen in aktuellen kommerziellen Anlagen oftmals mechanische Trennverfahren [4,5] und bieten eine berührungslose, wartungsfreie „Fit-and-Forget“-Lösung.

2.1. Ultrakurzpuls-Slab-Laser

Während UKP-Fasersysteme im Niedrigleistungs- und Energiebereich gut funktionieren, bieten Slab-Laser die gleichen Vorteile einer linearen Verstärkungsplattform in Bezug auf Flexibilität und die Möglichkeit, viel höhere Energieniveaus zu realisieren.

Die Slab-basierte TruMicro 6000-Serie ermöglicht Pulseenergien von bis zu 2 mJ bei einer durchschnittlichen Leistung von 200 W und einer Pulsdauer von 3 ps. Die Wiederholungsrate ist von 100 kHz bis 50 MHz bei voller mittlerer Leistung einstellbar und bietet die Möglichkeit, die Repetitionsrate wie bei den ns-Systemen auf den Prozess abzustimmen. Speziell für Schneidanwendungen entwickelt, bietet ein flexibler Pulse-on-Demand-Modus zudem die Möglichkeit, sicherzustellen, dass beim Schneiden komplexer Konturen die Puls-zu-Puls-Überlappung konstant bleibt, auch wenn die Dynamik des Scanners, beispielsweise bei kleinen Radien, eingeschränkt ist. Zur Demonstration und weiteren Skalierung der Schnittgeschwindigkeit wurde für die Schnittversuche ein Testsystem mit noch höherer Durchschnitteleistung eingesetzt (250 W).



Abbildung 3: Der Slab-basierte TruMicro 6000 bietet aufgrund seiner Flexibilität und ultrakurzen Pulsdauer eine enorme Bandbreite an Parametern um verschiedenste Herausforderungen beim Schneiden von Folien zu bewältigen.

Zur Untersuchung des Einflusses der Pulsdauer im UKP-Bereich wurde ein UKP-Faserlaser der TruMicro 2000-Serie verwendet. Hier bietet TRUMPF die einzigartige Möglichkeit, die Pulsdauer innerhalb von 300 fs – 20 ps per Softwareschnittstelle sehr schnell zu verändern und auf den Prozess abzustimmen, ohne Beeinträchtigung wichtiger Strahlparameter wie Pointing oder Rundheit des Strahls.

3. Ergebnisse

3.1. Unbeschichtete Metallfolien

Als Schlüsselement für beide Arten von Batteriefolien, Anoden und Kathoden, ist das Schneiden von dünnen Aluminium- und Kupferfolien eine zentrale Anwendung in der Batterieproduktion.

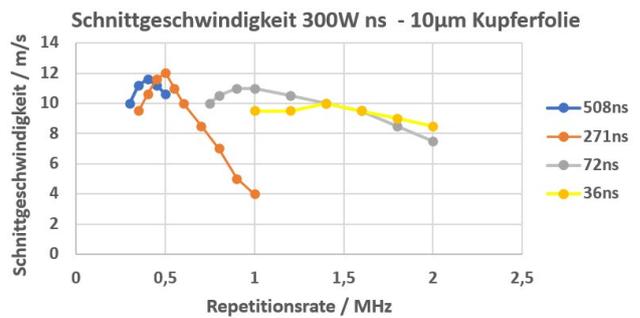


Abbildung 4: Schnittgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Repetitionsrate für verschiedene Pulsdauern im ns-Bereich auf 10µm Kupferfolie. Je nach Pulsdauer gibt es einen optimalen Bereich der Repetitionsrate.

Abbildung 4 zeigt die maximalen Schnittgeschwindigkeiten einer 10-µm-Kupferfolie in Abhängigkeit von der Repetitionsrate für Nanosekunden, Abb. 5 für UKP. Für beide Lasertypen wurden unterschiedliche Pulsdauern untersucht. Sowohl im Nanosekunden- als auch im UKP-Regime profitiert die maximale Schnittgeschwindigkeit von einer optimierten Repetitionsrate. Im UKP-Bereich sind die Ergebnisse weitgehend unabhängig von der verwendeten Pulsdauer. Die maximale Schnittgeschwindigkeit beider Laser lag bei rund 12 m/s in einer Einzelüberfahrt. Die Tatsache, dass die UKP-Ergebnisse nur mit einer Leistung von 100 W und nicht mit 300 W für den ns-Laser erzielt wurden, zeigt, dass das UKP-Schneiden von blanken Kupferfolien etwa dreimal effizienter sein kann als mit Lasern, die im ns-Bereich arbeiten.

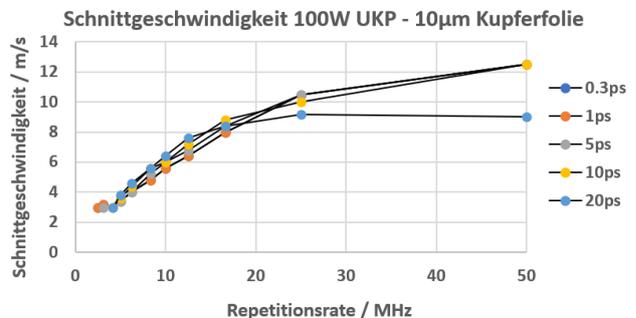


Abbildung 5: Schnittgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Repetitionsrate für verschiedene Pulsdauern im UKP-Bereich auf 10µm Kupferfolie. Die höchsten Schnittgeschwindigkeiten werden für die höchsten Repetitionsraten (50 MHz) erreicht.

Da eine effiziente Energiedeposition innerhalb eines einzelnen Pulses physikalisch begrenzt ist [6–8], ist es häufig erforderlich, höhere Repetitionsraten anstelle höherer Pulsenergien zu verwenden, um die Schneideffizienz zu maximieren und Qualitätsanforderungen zu erfüllen (vergleiche Abbildung 6).

Im Nanosekundenbereich hängen das optimale Energieniveau und die Repetitionsrate bei konstanter mittlerer Leistung von der Pulsdauer ab. Bei längeren Impulsen sind die optimalen Energieniveaus höher, was zu einer niedrigeren optimalen Wiederholungsrate für maximale Schnittgeschwindigkeit führt (Abbildung 4). Dies ist auf

eine erhöhte thermische Eindringtiefe längerer Pulse und eine Wärmeleitung innerhalb der Pulsdauer zurückzuführen. Im Gegensatz dazu erreichen im UKP-Regime, wo die Wärmeleitung innerhalb des Pulses vernachlässigbar ist, alle untersuchten Pulsdauern ähnliche Schnittgeschwindigkeiten. Lediglich bei den höchsten Wiederholraten (50 MHz) und damit niedrigsten Pulsenergien scheinen 20 ps im Vergleich zu kürzeren Pulsen etwas weniger effizient zu sein.

Bei Wiederholungsraten im MHz-Bereich kann aufgrund des kurzen Puls-zu-Puls-Abstands auch die Wärmeakkumulation ein dominierender Faktor sein, der sich auf die Schnittgeschwindigkeit und -qualität auswirkt. Die höchste Effizienz und Schnittgeschwindigkeit stehen in direktem Zusammenhang mit der Zone mit dem geringsten Wärmeeinfluss (HAZ), wie in Abbildung 6 dargestellt.

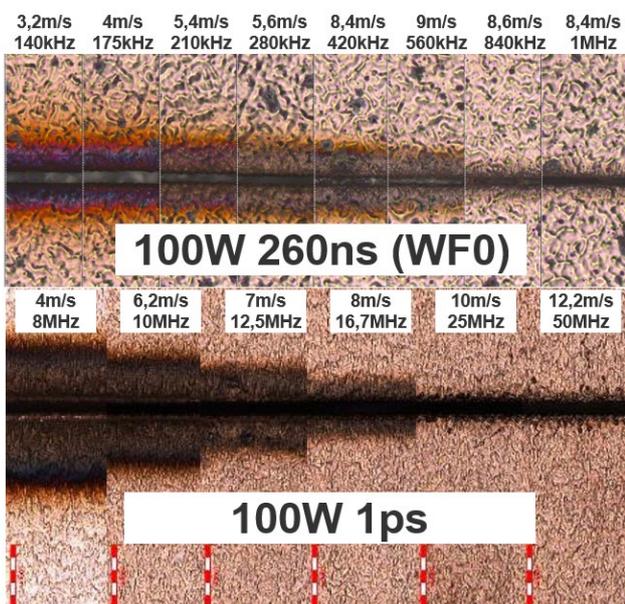


Abbildung 6: Übersicht Schnittqualitäten der Eintrittsseite für verschiedene Repetitionsraten bei konstanter Leistung von 100W und ns-Pulsen (oben) und UKP (unten).

Für Aluminiumfolie wurden ähnliche Abhängigkeiten hinsichtlich der Schnittgeschwindigkeit festgestellt. Vergleicht man also ähnliche Leistungsklassen beider Lasertypen, erreichen UKP-Laser beim Schneiden von dünnen Metallfolien deutlich höhere Schnittgeschwindigkeiten. Bei einer Leistung von 250 W im UKP-Bereich war bei beiden Materialien die Grenze des zur Strahlableitung eingesetzten Scanners erreicht, sodass noch höhere Schnittgeschwindigkeiten über 20 m/s laserseitig möglich gewesen wären.

Da in der Praxis jedoch oftmals deutlich geringere Schnittgeschwindigkeiten ausreichend sind, macht es kostenseitig Sinn unbeschichtete Metallfolien mit ns-Lasersystemen zu schneiden.

3.2. Beschichtete Anodenfolien

Abbildung 7 zeigt die zusammengefassten maximalen Schnittgeschwindigkeiten für eine beispielhafte

Graphitanodenbatteriefolie mit einer Kupferfilmdicke von ca. 6 µm. Wie beim Schneiden der reinen Metallfolie liegt der Schlüssel zur Maximierung der Schnittgeschwindigkeit in der Optimierung der zeitlichen Energie-deposition. Es wurde beobachtet, dass die Spitzenleistung, die Pulseenergie und die Repetitionsrate einen erheblichen Einfluss auf die Schnittgeschwindigkeit haben.

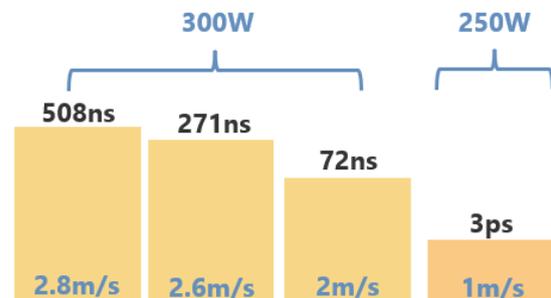


Abbildung 7: Maximal erreichte Schnittgeschwindigkeiten bei vergleichbaren Leistungsklassen in ns- und UKP-Bereich. Auf Anodenmaterial erreichen ns-Lasersysteme deutlich höhere Schnittgeschwindigkeiten.

Die maximal erreichten Schnittgeschwindigkeiten mit ns-Pulsen (Abbildung 7) zeigen, dass längere Pulse mit einer Dauer von 500 ns eine deutlich schnellere Schnittgeschwindigkeit ermöglichen als kürzere Pulse mit 72 ns, mit maximalen Geschwindigkeiten von 2,8 m/s bzw. 2,0 m/s. Im UKP-Bereich führt eine Erhöhung der Repetitionsrate mit den damit verbundenen geringen Pulsenergielevel zu einer höheren Effizienz und Schnittgeschwindigkeit. Wie in Abbildung 8 dargestellt, haben zu hohe Pulsenergien einen übermäßigen Energieeintrag zu Folge und legen den Kupferfilm frei.

Andererseits führen sehr hohe Repetitionsraten zu einer großen Menge an durch Wärmeakkumulation geschmolzenem Material an der Seitenwand des Schnitts. Hervorzuheben ist, dass die optimale Repetitionsrate für UKP (3-7 MHz) deutlich höher ist als die optimale Repetitionsrate für ns-Ergebnisse (~500 kHz) bei ähnlichen Leistungsniveaus.

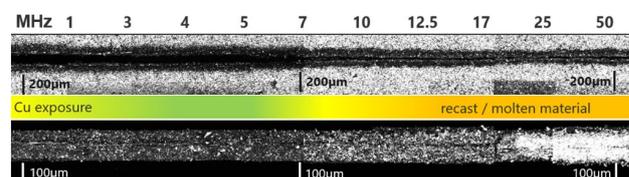


Abbildung 8: Schnittqualität der Eintrittsseite (oben) und der Schnittkante (unten) von einer beispielhaften Anodenfolie. Hohe Pulsenergien führen tendenziell zu einer ungewollten Exposition der Kupferlage, zu hohe Repetitionsenergien führen zu einer deutlichen Schmelzbildung innerhalb der Schnittfuge (rechts).

Es ist zu beachten, dass die optimale Pulsdauer und Repetitionsrate zum Schneiden blanker Folie mit den getesteten gepulsten Lasern von denen zum Schneiden beschichteter Materialien abweichen kann. Wenn bei einem Schneidprozess jedoch sowohl beschichtete als

auch unbeschichtete Folienelemente geschnitten werden müssen, empfiehlt es sich, Parameter zu verwenden, die für das Schneiden beschichteter Folien optimiert sind.

3.3. Beschichtete Kathodenfolien

Das Laserschneiden aktiver Kathodenbeschichtungen kann eine größere Herausforderung darstellen, da sich die Chemie der Beschichtung stark auf die Schnittgeschwindigkeit und -qualität auswirkt. Zur Bewertung der Schnittgeschwindigkeit und -qualität wurde eine beispielhafte Lithium-Eisen-Phosphat-Beschichtung (LFP) mit einer Aluminiumschicht von ca. 12 µm und einer Gesamtdicke von etwa 180 µm verwendet.

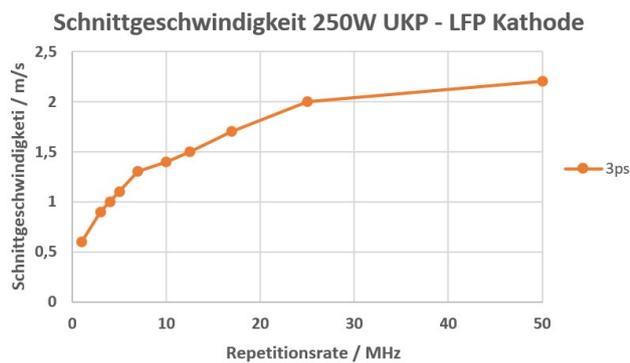


Abbildung 9: Schnittgeschwindigkeit LFP-Kathode in Abhängigkeit der Repetitionsrate für eine Pulsdauer von 3ps. Im UKP-Bereich profitiert der Schneidprozess der Kathode von sehr hohen Repetitionsraten (50MHz)

Im Vergleich zu den Schneidergebnissen des getesteten Anodenmaterials ergeben sich als optimale Parameter für die LFP-Kathode sowohl beim ns- als auch beim UKP-Schneiden höhere Repetitionsraten und damit niedrigere Pulsenergieniveaus (Abbildung 9-11). Darüber hinaus scheinen kürzere Pulse sowohl die Qualität als auch die Geschwindigkeit des Schneidprozesses zu verbessern. Die maximale Schnittgeschwindigkeit bei einer Einzelüberfahrt betrug beim getesteten ns-System ca. 1,2 m/s (Abbildung 11), während das UKP-System mit geringerer Durchschnittsleistung eine maximale Schnittgeschwindigkeit von ca. 2,2 m/s erreichte (Abbildung 12).

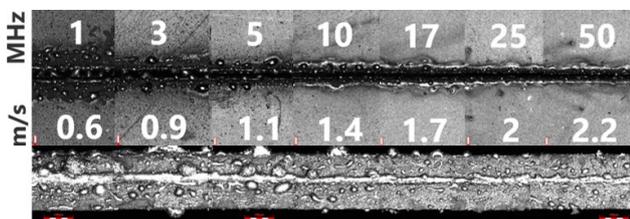


Abbildung 10: Schnittqualität einer LFP-Kathode in Abhängigkeit der Repetitionsfrequenz (Eintritt oben, Kantenqualität unten). Mit steigender Repetitionsfrequenz steigt sowohl die Schnittqualität als auch die Schnittgeschwindigkeit.

Abbildung 10 zeigt die Schnittqualität in Abhängigkeit von verschiedenen Repetitionsraten und den entsprechenden maximalen Schnittgeschwindigkeiten für das UKP-Schneiden. Bei niedrigeren Repetitionsraten bzw.

höheren Pulsenergieniveaus ist ein Trend zu einer stärkeren Schmelztropfen- und Gratbildung am Laserschneideintritt und an der Schneidkante zu beobachten. Höhere Repetitionsraten im Bereich von mehreren zehn MHz bewirken eine deutlich geringere Wärmeeinflusszone bei gleichzeitig höheren Schnittgeschwindigkeiten.

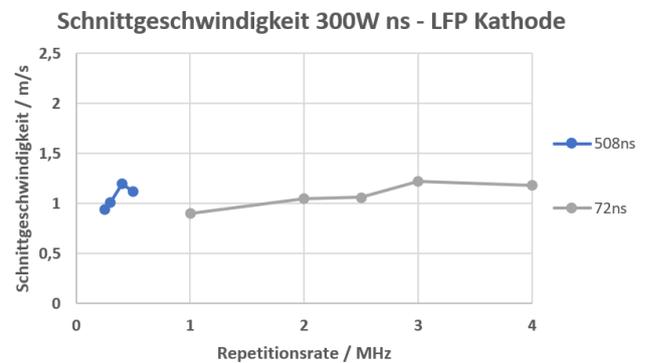


Abbildung 11: Maximal erreichte Schnittgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Repetitionsrate im ns-Bereich (LFP-Kathode).

Um die Schnittqualität noch weiter zu steigern, wurden für das LFP-Material verschiedene Bearbeitungsstrategien getestet. Das Schneiden in einer Überfahrt ist oft das Mittel der Wahl zum Schneiden von Folien, weist jedoch qualitativ einige Einschränkungen auf, wie z. B. eine erhöhte Wärmeeinflusszone (HAZ) im Vergleich zum Multi-pass schneiden, bei welchem das Material in mehreren Überfahrten geschnitten wird. Abbildung 13 (rechts) zeigt beispielhaft eine verbesserte Schnittqualität bei einer Multi-Pass-Schnittstrategie.

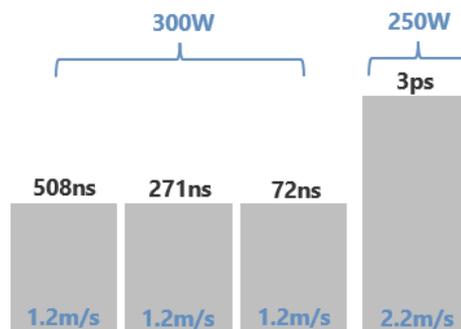


Abbildung 12: Übersicht der maximal erreichten Schnittgeschwindigkeiten bei vergleichbaren Leistungsklassen. UKP-Laser erreichen eine ca. 2-fache Effizienz wodurch deutlich schneller geschnitten werden kann.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch die zunehmende Umstellung auf erneuerbare Energien und Elektromobilität werden laserbasierte Schneidverfahren für Batteriefolien immer bedeutender. Allerdings machen unterschiedlichste Schneidbedingungen und die von den Herstellern verwendeten komplexen Materialkombinationen diese Anwendung zu einer großen Herausforderung.

Ein Weg, um die Anforderungen des Schneidens von Batteriefolien zu erfüllen, besteht in der Verwendung von flexiblen Laserplattformen welche eine breite Palette von einstellbaren Parametern bieten und so eine

Optimierung beim Schneiden schwieriger Materialkombinationen ermöglichen. Welcher Lasertyp sich zum Schneiden von Batteriefolien am besten eignet, hängt von verschiedenen Faktoren ab, unter anderem von der gewünschten Schnittgeschwindigkeit, der Kantenqualität und der tolerierten Materialschädigung. Nanosekundenlaser sind für ihre hohe Schnittgeschwindigkeit und gute Kantenqualität bekannt, während UKP-Laser sich über geringere Wärmeentwicklung und minimale Materialschädigung auszeichnen. Im Vergleich zum Schneiden mit Nanosekunden erfordert das UKP-Schneiden deutlich höhere Repetitionsraten im Multi-MHz-Bereich, um ein effizientes Schneiden zu ermöglichen und von den kürzeren Pulsen zu profitieren. Um die besten Ergebnisse beim Batteriefolienschneiden zu erzielen, ist es wichtig, die richtigen Laser- und Parametereinstellungen sorgfältig abzuwägen und auszuwählen. Die flexiblen gepulsten MOPA-Laserplattformen von TRUMPF bieten optimale Parametereinstellungen sowohl für den ns- als auch für den UKP-Bereich. Beide industriell eingesetzten Laserplattformen verfügen über ein breites Spektrum an einstellbaren Parametern, wodurch sie bestens für

die Anforderungen aktueller und zukünftiger Batterieanwendungen geeignet sind.

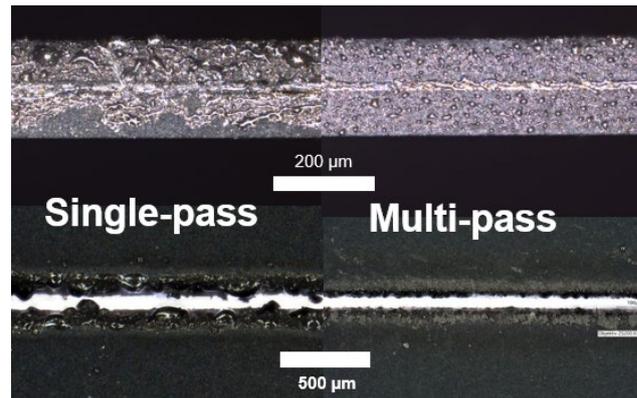


Abbildung 13: LFP-Kathode: Vergleich von einem Single-pass Prozess (links) mit einem Multi-pass Prozess (rechts). Durch Verwendung von mehreren Überfahrten lässt sich die Schnittqualität bei vergleichbarer effektiver Schnittgeschwindigkeit deutlich verbessern.

Literaturverzeichnis

- [1] Korthauer, Reiner, ed. *Lithium-ion batteries: basics and applications*. Springer, (2018).
- [2] Placke, T., Kloepsch, R., Dühnen, S., & Winter, M. (2017). Lithium ion, lithium metal, and alternative rechargeable battery technologies: the odyssey for high energy density. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 21(7), 1939-1964.
- [3] Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials today*, 18(5), 252-264.
- [4] Kriegler, J., Nguyen, T. M. D., Tomcic, L., Hille, L., Grabmann, S., Jaimez-Farnham, E. I., & Zaeh, M. F. (2022). Processing of lithium metal for the production of post-lithium-ion batteries using a pulsed nanosecond fiber laser. *Results in Materials*, 15, 100305.
- [5] Lutey, A. H., Fortunato, A., Carmignato, S., & Fiorini, M. (2017). High speed pulsed laser cutting of LiCoO₂ Li-ion battery electrodes. *Optics & Laser Technology*, 94, 90-96.
- [6] Raciukaitis, Gediminas, Marijus Brikas, and Mindaugas Gedvilas. "Efficiency aspects in processing of metals with high-repetition-rate ultra-short-pulse lasers." *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. Vol. 2008. No. 1. Laser Institute of America, 2008.
- [7] Neuenschwander, B., Kramer, T., Lauer, B., Jaeggi, B., "Burst mode with ps-and fs-pulses: Influence on the removal rate, surface quality, and heat accumulation," *Proc. SPIE 9350, Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XX*, 93500U (2015); doi: 10.1117/12.2076455.
- [8] Kramer, T., Zhang, Y., Remund, S., Jaeggi, B., Michalowski, A., Grad, L., Neuenschwander, B., "Increasing the specific removal rate for ultra short pulsed laser-micromachining by using pulse bursts," *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering* 12(2), 107 (2017); doi: 10.2961/jlmn.2017.02.0011.