

KURZGUTACHTEN

Handel auf Basis des Regelleistungs-Abrufs

Eine empirische Analyse des zeitlichen Zusammenhangs
zwischen Regelleistungs-Abrufsignal und Strompreisen auf
dem deutschen Intraday-Markt

Finale Version vom 14. Oktober 2021

Im Auftrag von BayWa r.e. Energy Trading, MVV Trading, Quadra Energy, Sunnic Light-house und Trailstone

Autoren:

Lion Hirth (hirth@neon.energy)

Jonathan Mühlenpfordt (muehlenpfordt@neon.energy)

Handel auf Basis des Regelleistungs-Abrufs

Eine empirische Analyse des zeitlichen Zusammenhangs zwischen Regelleistungs-Abrufsignal und Strompreisen auf dem deutschen Intraday-Markt

Diese Studie ist verfügbar unter neon.energy/intraday-regelleistung

Neon Neue Energieökonomik ist ein energiewirtschaftliches Beratungsunternehmen mit Sitz in Berlin. Als Boutique sind wir seit 2014 spezialisiert auf anspruchsvolle quantitative und ökonomisch-theoretische Analysen rund um den Strommarkt. Mit Beratungsprojekten, Studien und Schulungen unterstützen wir Entscheidungsträger bei den aktuellen Herausforderungen und Zukunftsfragen der Energiewende. Zu unseren Kunden gehören Regierungen, Regulierungsbehörden, Netzbetreiber, Energieversorger und Stromhändler aus Deutschland und Europa.

Kontakt:

Neon Neue Energieökonomik GmbH
Karl-Marx-Platz 12
12043 Berlin

Prof. Dr. Lion Hirth
hirth@neon.energy
+49 157-55 199 715



Inhaltsangabe

Zusammenfassung.....	4
1 Einleitung	5
2 Hintergrund	6
2.1 Der Intraday-Handel.....	6
2.2 Regelleistungs-Abruf	10
2.3 Handelsstrategien auf Basis des RL-Abrufs.....	11
3 Methodik.....	12
3.1 Grundsätzliches Vorgehen.....	12
3.2 Regressionsmodelle	12
3.3 Daten und Datenaggregation	13
3.4 Mögliche Störfaktoren der Identifikationsstrategie	15
3.5 Bewertungs-Metriken	16
4 Ergebnisse	16
4.1 Basisspezifikation	17
4.1.1 Kurzfristigster Handel.....	17
4.1.2 Gesamter Handelszeitraum	20
4.2 Nicht-linearer Effekt.....	21
4.3 Einfluss des Regelarbeitsmarkts.....	23
4.4 Auto-regressiver Preis.....	24
4.5 Erklärungskraft	25
4.6 Weitere Robustheits-Analysen.....	27
5 Schlussfolgerungen	28
Appendix.....	29

Zusammenfassung

Hintergrund. Die Systembilanz („NRV-Saldo“) ist ein wichtiger Preistreiber auf dem Intraday-Markt. Der Abruf von Regelleistung, der Rückschlüsse auf die Systembilanz ermöglicht, wird in Deutschland nicht in Echtzeit veröffentlicht, ist also nur den Anbietern von Regelenergie bekannt. Nutzen diese den so erlangten Informationsvorsprung zum Handel auf dem Strommarkt („*Frontrunning*“), erleiden andere Marktteilnehmer einen wirtschaftlichen Nachteil.

Fragestellung. Diese Studie untersucht empirisch, ob auf dem deutschen Intraday-Markt Handel auf Basis des Abrufs von Regelleistung stattfindet. Die Untersuchung geschieht durch eine Auswertung von Preisbewegungen im zeitlichen Zusammenhang zum Abrufsignal.

Methodik. Zu diesem Zweck wurden alle 80 Mio. Transaktionen mit Viertelstunden- und Stundenkontrakten auf der EPEX-Intraday-Handelsplattform sowie alle 50 Mio. SRL- und MRL-Abrufe im Zeitraum Anfang 2020 bis Mitte 2021 im Rahmen von multiplen Regressionsanalysen mit einer zeitlichen Auflösung von 1 Minute ausgewertet. Dies ermöglicht uns eine Untersuchung des unmittelbaren zeitlichen Zusammenhangs. Außerdem können wir für weitere Preistreiber statistisch kontrollieren, beispielsweise für Erzeugungs-Prognosen und die späteren Veröffentlichungen der Abrufe. Die extrem große Anzahl an Beobachtungen ermöglicht uns die Untersuchung einer Vielzahl von Spezifikationen, Kontrollvariablen, zeitlicher Strukturen und nicht-linearer Effekte sowie eine Differenzierung von Produkten und Handelszeitpunkten.

Ergebnis. Wir finden einen statistisch signifikanten, quantitativ bedeutsamen und überaus robusten Zusammenhang zwischen Regelleistungs-Abruf und Intraday-Preisen. Nach SRL- und MRL- Abrufen kommt es systematisch zu Preisbewegungen bei allen Produkten mit Lieferzeitpunkt in den folgenden zwei Stunden. Die Preisbewegungen sind dabei bei vielen Produkten so auffällig, dass wir mit einer Konfidenz von weit mehr als 99,99% ausschließen können, dass es sich um zufällige Schwankungen handelt.

Beispiel. Findet beispielsweise ab 11:30 ein positiver SRL-Abruf von 1000 MW über 15 Minuten statt, so ist nach unseren Schätzungen der Strompreis um 11:46 für die Lieferung von 12:00-12:15 im Mittel um 34 €/MWh höher als ohne Abruf. Darüber hinaus steigt auch der Preis für alle weiteren neun Stunden- und Viertelstundenkontrakte mit Lieferbeginn zwischen 12:00 und 14:00.

Robustheit. Der Effekt ist dabei tendenziell umso größer, je kürzer der zeitliche Abstand bis Lieferbeginn und je höher der Abruf ist. Der Effekt ist außerdem bei Viertelstundenprodukten größer als bei Stundenprodukten, bei positiven Regelenergieabrufen stärker als bei negativen und bei einem MRL-Abruf stärker als bei SRL. Seit der Einführung des Regelarbeitsmarktes hat sich der Einfluss noch verstärkt. Diese Unterschiede sind so zu erwarten und ergeben ein kohärentes Gesamtbild. Jedoch finden wir selbst in Fällen mit kleinerem Effekt oft einen statistisch hoch signifikanten Zusammenhang. Diese Ergebnisse legen nahe, dass Marktakteure die Information aus dem Regelleistungs-Abruf für Handelsentscheidungen nutzen.

1 Einleitung

Marktdesign für die Energiewende. Der kurzfristige Intraday-Großhandelsmarkt und das System der Regelleistung sind zwei Kernelemente des deutschen und europäischen Strommarktdesigns. Sie sind essenziell für die Versorgungs- und Systemsicherheit und die Integration von Erneuerbaren Energien, und in ihrer Bedeutung im Rahmen der Systemtransformation nehmen sie stetig weiter zu. Intraday-Markt und Regelleistung haben für viele Stromerzeuger und Direktvermarkter außerdem eine große wirtschaftliche Bedeutung. Ein reibungsloses Zusammenspiel beider Systeme und das Vertrauen der Marktakteure in beide Marktsegmente sind wesentlich für das weitere Gelingen der Energiewende.

Faire Bedingungen. Wettbewerbliche Märkte dienen dem Wohl der Gesellschaft, wenn einige Voraussetzungen wie die Abwesenheit von Marktmachtmissbrauch erfüllt sind. Eine weitere zentrale Voraussetzung sind faire und gleiche Bedingungen für Marktakteure. Informationsasymmetrien, also mehr Wissen bei einigen Akteuren als bei den anderen, unterminieren das Marktgeschehen. Auf Finanzmärkten, aber auch auf Strom-Großhandelsmärkten bedeutet dies insbesondere, dass alle Marktakteure zum gleichen Zeitpunkt Zugang zu preisrelevanten Informationen erhalten. Dieses Prinzip ist Ausgangspunkt für eine Vielzahl von Regulierungen, darunter auch der REMIT-Verordnung.

Kurzfristige Preisbildung. Im kurzfristigen Stromhandel, wenige Stunden bis Minuten vor Lieferbeginn, sind nur noch wenige Anlagen in der Lage, Stromerzeugung oder -verbrauch anzupassen. Eine zusätzliche Nachfrage nach Strom (Knappheit) oder zusätzliches Angebot (Überschuss) haben deswegen selbst bei kleinen Volumina oft starke Auswirkungen auf den Preis. Gleichzeitig unterliegen die Erzeugung und der Verbrauch insbesondere bei ungewöhnlichen Wettersituationen auch kurzfristig erheblichen Unsicherheiten, auch weil Echtzeitdaten von vielen Erzeugern und Verbrauchern nicht vorliegen. Dies gilt insbesondere für Standardlastprofil-Kunden. Jede Information über die Systembilanz, also die Differenz zwischen Erzeugung und Verbrauch, hat deswegen einen gewichtigen Einfluss auf den kurzfristigen Strompreis.

Informationsgehalt des Regelleistungs-Abrufs. Der Abruf von Regelleistung enthält Informationen über die aktuelle und ggf. auch von den ÜNB erwartete Systembilanz (Unter-/Übererzeugung). Weder Systembilanz noch Abruf von Regelleistung werden in Deutschland in Echtzeit veröffentlicht. Aber natürlich ist der Abruf den Anbietern von Regelleistung bekannt. Diese Firmen sind in aller Regel gleichzeitig auch am Intraday-Markt als Händler aktiv. Regelleistungs-Anbieter erhalten so vor allen anderen Händlern exklusive Informationen über die Systembilanz, die sie gewinnbringend einsetzen können, indem sie früher als andere kaufen oder verkaufen.

Preiseffekt des Abrufs. Ein solcher Handel würde den Preis auf dem Intraday-Markt beeinflussen. Sollte ein solcher Handel also stattfinden, müsste ein Preiseffekt in unmittelbarem zeitlichem Zusammenhang zum Abruf von Regelleistung zu beobachten sein, noch bevor andere Marktakteure durch angepasste Erzeugungsprognosen oder Veröffentlichungen der ÜNB von der veränderten Situation Kenntnis erlangen. Kurz nach dem Abruf von positiver Regelleistung

sollte also ein Preissprung nach oben zu finden sein. Bei negativer Regelleistung ist der Effekt umgekehrt.

Diese Studie. Gegenstand dieses Kurzgutachtens ist eine empirische Analyse, ob auf dem deutschen Großhandelsmarkt für Strom Handelsgeschäfte auf Basis des Abrufs von Regelleistung getätigt werden. Die Untersuchung geschieht durch eine Auswertung der Intraday-Preisbewegungen im zeitlichen Zusammenhang zum Abruf von Regelenergie. Uns interessiert insbesondere, ob systematische Preisänderungen nach dem Abruf von Regelleistung, aber vor der Veröffentlichung dieser Abrufe zu finden sind. Sollte dies der Fall sein, lässt sich das wohl nur dadurch erklären, dass Marktteilnehmer mit Kenntnis der Abrufe, also Anbieter von Regelleistung oder Netzbetreiber, diese Information für Handelsentscheidungen nutzen.

Keine juristische Prüfung. Eine juristische Einordnung, insbesondere eine Prüfung, ob die oben genannte Handelsstrategie Insiderhandel im Sinne von REMIT darstellt, ist nicht Gegenstand des Gutachtens. Ebenso wenig soll mit diesem Gutachten identifiziert werden, welche Marktteilnehmer solche Handelsgeschäfte tätigen; dies ist mit der genutzten Methodik ohnehin nicht möglich.

2 Hintergrund

Dieser Abschnitt erläutert den Hintergrund unserer Analysen: die Funktionsweise des deutschen Intraday-Handels, den Abruf von Regelleistung und die Frage, welche möglichen Handelsstrategien sich daraus ergeben.

2.1 Der Intraday-Handel

Bedeutung des ID-Handels. Als Intraday (ID)-Handel wird das kurzfristige Marktsegment auf den europäischen Großhandelsmärkten für Strom bezeichnet. Es umfasst den Handel, der nach der Day-Ahead-Auktion stattfindet, welche um 12:00 Uhr für den Folgetag durchgeführt wird. Der Intraday-Handel findet bis knapp vor Lieferung statt und umfasst den Handel mit Viertelstunden-Produkten. Dieser zeitlich hoch aufgelöste Kurzfristhandel hat grundlegende Bedeutung für die Energiewende. Während traditionelle Stromsysteme eng an starren Fahrplänen ausgerichtet sind, werden Wind- und Solarenergie, aber auch neue Verbraucher wie Wärmepumpen und batterieelektrische Fahrzeuge deutlich stärker kurzfristigen Wertschwankungen ausgesetzt. Flexibilitätsressourcen wie Batterien bieten die kurzfristige Möglichkeit zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage. Ein funktionierender, liquider Intraday-Markt, dessen Preise von Marktteilnehmern als verlässliche Signale für den Anlageneinsatz angesehen werden, ist essenziell für den weiteren Erfolg der Energiewende.

Auktion und kontinuierlich. Der Intraday-Handel findet over-the-counter und auf verschiedenen Börsenplattformen statt. Der weitaus überwiegende Teil wird dabei über die Börse EPEX

SPOT abgewickelt. Dort besteht der ID-Markt aus zwei Segmenten, einer Eröffnungsauktion um 15:00 Uhr sowie dem kontinuierlichen Handel ab 16:00 Uhr – anders als der Name suggeriert, eröffnet der Intraday-Handel also bereits am Vortag. Etwa 15% des Handelsvolumens entfallen auf die Auktion und 85% auf den kontinuierlichen Handel. Die Eröffnungsauktion ist eine zweiseitige Auktion mit der Börse als Auktionator, ähnlich wie die Day-Ahead-Auktion. Der kontinuierliche Handel ähnelt dem Handel von Aktien, Anleihen und anderen Wertpapieren. Hier können Marktteilnehmer jederzeit Kauf- und Verkaufsangebote in Form von Preisen und Mengen abgeben, die in anonymisierter Form in Orderbüchern veröffentlicht werden. Andere Marktteilnehmer können diese Angebote dann jederzeit annehmen. Damit hat jede einzelne Transaktion ein eigenes Volumen und einen eigenen Preis.

Produkte. Auf dem deutschen Intraday-Markt werden Stunden- und Viertelstundenkontrakte gehandelt, die sich auf unterschiedliche Lieferzeiträume beziehen. Die Stundenprodukte sind konzeptionell äquivalent zu Blockgeboten von vier Viertelstundenprodukten. Halbstunden- sowie Blockprodukte existieren zwar ebenfalls, spielen praktisch aber so gut wie keine Rolle. Für jeden Tag werden also 120 verschiedene Produkte gehandelt, 24 Stundenprodukte und 96 Viertelstundenprodukte. Es werden folglich zu jedem Zeitpunkt eine Vielzahl von Produkten parallel gehandelt, wobei die Anzahl im Laufe des Handelsgeschehens abnimmt, wenn mehr und mehr Produkte in die Lieferung gehen. Um 11:50 können Händler beispielsweise für den laufenden Tag noch zwölf verschiedene Stundenprodukte sowie 48 Viertelstundenprodukte handeln. Das Eintreffen einer preisrelevanten Information kann in diesem Fall also einen Effekt nicht auf „den“ Intraday-Preis, sondern auf den Preis von 60 verschiedenen Kontrakten haben. Über das Jahr ergibt dies 43.800 verschiedene Lieferzeiträume und damit die gleiche Anzahl an Produkten, die jeweils über einen Zeitraum von neun bis 33 Stunden lang gehandelt werden. Anders als bei den Preisen aus Day-Ahead-Auktionen (oder den Preisen von Aktien oder Anleihen) sind Intraday-Preise also nicht als eine einzige kontinuierliche Zeitreihe zu verstehen, sondern als eine Vielzahl von kurzen, sich überlappenden Zeitreihen. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Preis-Zeitreihen von sechs parallel gehandelten Produkten.

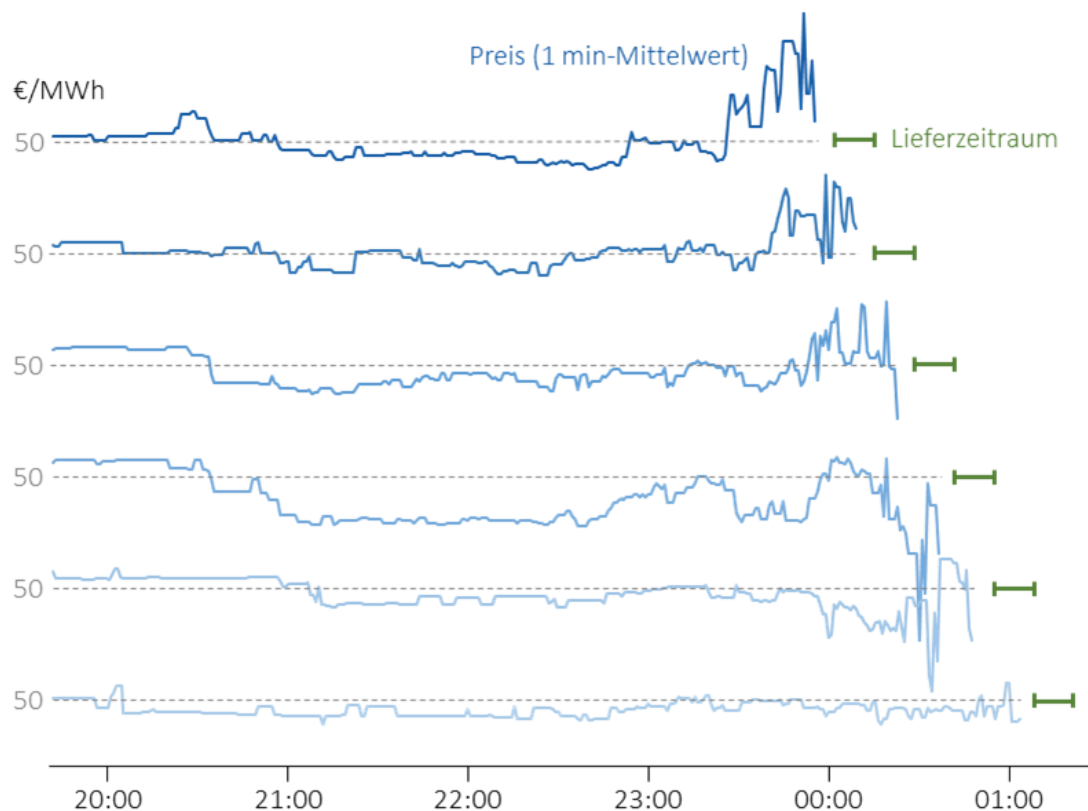


Abbildung 1. Preise von sechs parallel gehandelten Viertelstundenkontrakten am 2. Juni 2020: volumen-gewichtete Durchschnittspreise je Minute (blau) und Lieferzeitraum (grün). Wie auf dem Intraday-Markt typisch, sind Preisbewegungen ähnlich, aber nicht identisch, und die stärksten Preisbewegungen sind kurz vor Handelsende zu beobachten.

Transaktionen. Der deutsche Intraday-Markt ist durch eine große Anzahl von Transaktionen mit kleinem Volumen gekennzeichnet. Viele Händler stützten sich dabei auf Algorithmen-basierten automatisierten Handel (Bots). Im Mittel werden 1,7 Transaktionen je Sekunde mit einem Volumen von durchschnittlich zwei bis drei MWh durchgeführt. Dabei verteilen sich die Transaktionen jedoch auf eine Vielzahl von Produkten und sind darüber hinaus auf die letzten Handelsstunden konzentriert, so dass häufig über mehrere Stunden einzelne Kontrakte kaum gehandelt werden. Neben Preis und Volumen ist jede Transaktion durch zwei Zeitparameter gekennzeichnet, den Handelszeitpunkt sowie die Lieferperiode. Abbildung 2 zeigt illustrativ die Handelsgeschäfte in einen Drei-Stunden-Zeitraum am 21. Oktober 2020. Es werden neun Viertelstundenprodukte gezeigt (also nur ein Teil der aktuell gehandelten Produkte), die farblich unterschieden sind. Auf der X-Achse ist der Handelszeitpunkt aufgetragen, auf der Y-Achse der Preis. Das Transaktionsvolumen ist durch die Punktgröße dargestellt. Eine wie auch immer geartete Aggregation dieser Preise zu einer einzelnen Zeitreihe scheint wenig sinnvoll.

EUR per MWh

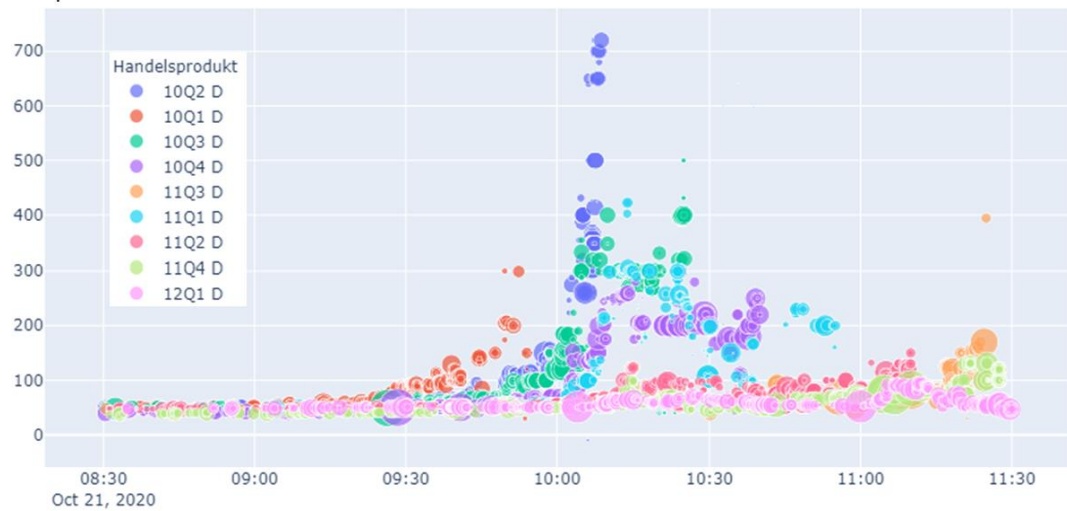


Abbildung 2. Einzelne Transaktionen für neun Produkte in einem Zeitraum von drei Stunden am 21. Oktober 2020.

Gate Closure. Ähnlich wie die Day-Ahead-Auktion ist auch der Intraday-Handel in Europa implizit gekoppelt, d.h. Importe und Exporte werden im Rahmen des normalen Handelsgeschehens abgewickelt. Der grenzüberschreitende Handel wird über die sogenannte „Single-Intraday-Coupling“ (SIDC)-Plattform abgewickelt und findet bis 60 Min. vor Lieferbeginn statt (sog. Gate Closure). Bis 30 Min. vor Lieferung ist noch deutschlandweiter Handel möglich, danach noch Handel jeweils innerhalb der vier deutschen Regelzonen. Dieser als „Single Delivery Area Trading“ (SDAT) bezeichnete Handel ist auf EPEX SPOT bis 5 Min vor Lieferbeginn möglich. Etwa zwei Drittel aller Transaktionen fallen in den Zeitbereich zwei Stunden vor Lieferung. Innerhalb dieses Zeitraums ist wiederum eine Konzentration des Handelsgeschehens auf die Minuten jeweils kurz vor den genannten drei Gate Closure-Zeitpunkten festzustellen (Abbildung 3).

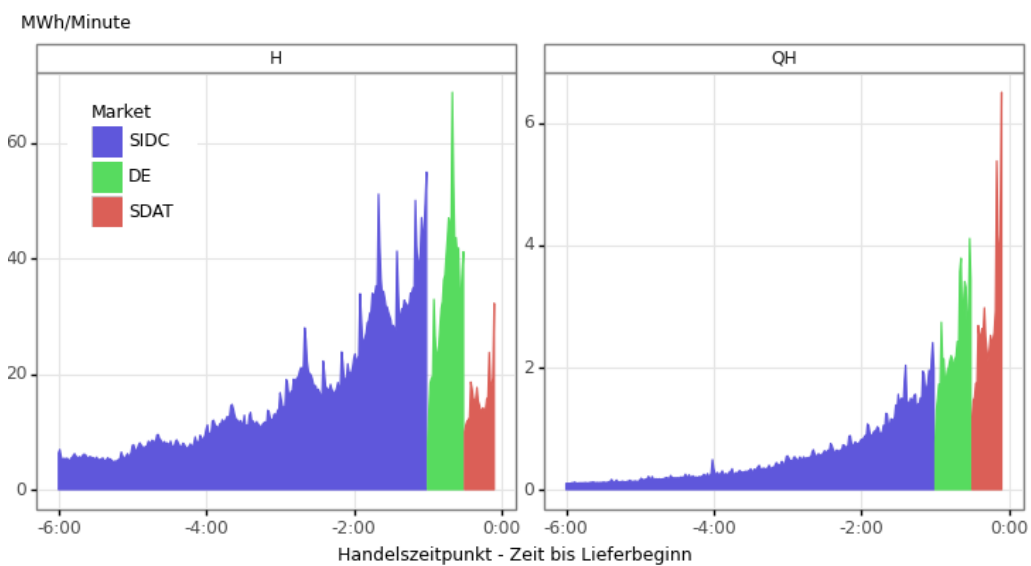


Abbildung 3. Handelsvolumen relativ zu Beginn des Lieferzeitpunkts für Stunden- (links) und Viertelstundenprodukte (rechts).

2.2 Regelleistungs-Abruf

Funktionsweise von Regelennergie. Regelennergie wird genutzt, um möglichst zu jedem Zeitpunkt das Gleichgewicht aus physikalischer Erzeugung und Verbrauch von Strom aufrecht zu erhalten. Dabei soll das Gleichgewicht sowohl auf Ebene des Synchrongebietes wie auch auf Ebene der Regelzone (bzw. Netzregelverbund) gewahrt werden, um die Netzfrequenz bei 50 Hz sowie den „Area Control Error“ bei Null zu halten.

Arten. Dafür werden drei Arten von Regelennergie genutzt: *Frequency Containment Reserve* (FCR) sowie *automatische* und *manuelle Frequency Restoration Reserve* (aFRR, mFRR). Im Stromhandel sind bis heute die veralteten Bezeichnungen Primärregelleistung (PRL), Sekundärregelleistung (SRL) und Minutenreserve (MRL) gebräuchlich, die wir deshalb auch in dieser Studie verwenden.

Beschaffung. Alle drei Regelennergiearten werden als operative Reserve (Regelleistung) am Vortag von den Übertragungsnetzbetreibern durch Auktionen beschafft und dann bei Bedarf kurzfristig abgerufen. Anbieter von Regelleistung sind insbesondere thermische und Pumpspeicher-Kraftwerke, oft auch im Verbund. Die Gebote der Beschaffungsauktion werden in anonymisierter Form veröffentlicht. Seit November 2020 ist darüber hinaus das Anbieten von Regelennergie jenseits der Leistungsauktion möglich (Regelarbeitsmarkt), wovon Marktakteure jedoch bisher wenig Gebrauch machen.

Abruf. Der Abruf der PRL erfolgt als Funktion der jeweils lokal gemessenen Netzfrequenz. SRL und MRL werden von den ÜNB per elektronischem Signal aktiviert. Der SRL-Abruf erfolgt dabei in Form eines sekundlich aktualisierten Sollwertes, der MRL-Abruf als Fahrplanprodukt jeweils für ganze Viertelstunden spätestens siebenminuten vor Lieferbeginn. Die Aktivierung hat dabei zum Ziel, die deutsche Systembilanz (NRV-Saldo), also den Saldo von Stromerzeugung und -verbrauch, zurückzuführen. Im Gegensatz zum PRL-Abruf gibt ein SRL- oder MRL-Abruf also Aufschluss über die aktuelle oder von den ÜNB kurzfristig erwartete Systembilanz. Bei der Aktivierung der SRL und MRL wenden die ÜNB das Merit-Order-Prinzip an, das heißt, es werden zunächst die Anlagen mit dem niedrigsten Arbeitspreis aktiviert. Allerdings können die Netzbetreiber von diesem Prinzip abweichen, um den Stromfluss auf engpassbehafteten Leitungen nicht weiter zu steigern. Des Weiteren können Netzbetreiber Ungleichgewichte in Deutschland auch im Rahmen der internationalen ÜNB-Kooperation „International Grid Control Cooperation“ ausgleichen; nicht jede Abweichung von der ausgeglichenen Systembilanz führt also zwingend zur Aktivierung von Regelleistung.

Veröffentlichung. Anders als in anderen europäischen Ländern veröffentlichen die deutschen ÜNB weder Systembilanz noch Regelleistungs-Abruf in Echtzeit. Vielmehr werden die Viertelstundenwerte für SRL- und MRL-Abruf sowie die Regelzonensaldi von den vier ÜNB separat zwischen null und elf Minuten nach Ende jedes viertelstündigen Lieferzeitraums veröffentlicht. Darüber hinaus wird der sekundliche SRL-Sollwert am Folgetag veröffentlicht.

Geplante Änderungen. Im Rahmen der Implementierung der internationalen MARI- und PI-CASSO-Plattformen für MRL und SRL ergeben sich in den kommenden Monaten einige Änderungen. Beispielsweise können Anbieter ihre MRL-Angebote zur Direkt-Aktivierung anstelle einer Fahrplan-Aktivierung freigeben, Anbieter können komplexe Angebote abgeben und als

Preisregel wird marginal pricing pay-as-bid ablösen. Außerdem können dann deutsche Anbieter von Regelernergie aktiviert werden, um Regelernergiebedarf im Ausland zu decken, so dass Rückschlüsse auf die deutsche Systembilanz schwieriger werden dürften. Für den von uns betrachteten Beobachtungszeitraum hat dies jedoch keine Auswirkungen.

2.3 Handelsstrategien auf Basis des RL-Abrufs

Informationsgehalt des RL-Abrufs. Der Abruf von SRL und MRL enthält also Informationen über die aktuelle und ggf. auch von den ÜNB kurzfristig erwartete Systembilanz. Eine Aktivierung von positiver Regelleistung bedeutet, dass das System tendenziell unterdeckt ist; die Aktivierung von negativer Regelleistung zeigt eine Überdeckung an. Diese Information ist in Echtzeit nur den abgerufenen Anbietern von Regelernergie bekannt, nicht jedoch allen anderen Marktparteien.

Preiseffekt. Die Systembilanz hat als Indikator für Unter-/Übererzeugung einen Einfluss auf den Intraday-Preis. Wenn das System unterdeckt ist, spricht dies für eine steigende Nachfrage von Strom. Kurz- bis mittelfristig sind Käufe der unterdeckten Bilanzkreise zu erwarten. Diese gehen mit steigenden Intraday-Preisen einher. Eine durch die Systembilanz bzw. den Abruf von positiver Regelernergie angezeigte Stromknappheit kann z.B. eine geringere als prognostizierte Erzeugung oder eine höhere als erwartete Stromnachfrage bedeuten. Die betroffenen Marktteure werden dann, sobald sie die Unterdeckung bemerken, am Intraday-Markt Strom nachkaufen (müssen), um den eigenen Bilanzkreis ausgeglichen zu halten. Durch diese zusätzliche Nachfrage steigt der Intraday-Preis. Umgekehrt lässt der Abruf negativer Regelernergie auf ein überdecktes System und in der Folge zusätzliche Verkaufsaktivitäten und sinkende Intraday-Preise schließen.

Frontrunning. Marktteure, die Informationen über die aktuelle Systembilanz vor anderen Marktteuren erhalten, können dieses exklusive Wissen gewinnbringend einsetzen, indem sie früher als die Konkurrenz kaufen oder verkaufen. Diese Informationsasymmetrie betrifft jedoch nicht nur Direktvermarkter, sondern jeden Marktteilnehmer, der ein Signal zum Regelleistungsabruf erhält, da es Gewinnmöglichkeiten durch long- bzw. short-selling erlaubt. Diese Handelsstrategien werden als „Frontrunning“ bezeichnet. Sollten solche Handelsstrategien eingesetzt werden, müsste dies zu systematischen Intraday-Preisbewegungen zeitlich kurz nach dem Abruf von Regelleistung führen.

Umverteilung. Durch diese Handelsstrategien wird, anders als bei anderen Handelsgeschäften, kein volkswirtschaftlicher Mehrwert geschaffen, im Vergleich zu einer Situation, in der alle Marktteilnehmer gleichzeitig die relevanten Systeminformationen bekommen. Vielmehr ist es eine reine Umverteilung aufgrund asymmetrischer Information: Während die Marktparteien mit dem Informationsvorsprung finanziell von ihm profitieren, hat der Rest des Marktes im gleichen Umfang finanzielle Nachteile.

3 Methodik

Ziel dieser Studie ist es, einen möglichen Handel auf Basis des Regelleistungs-Abrufs empirisch zu identifizieren. Im Folgenden stellen wir unser grundsätzliches methodisches Vorgehen dar, stellen dann die verwendeten Regressionsmodelle vor und gehen dann auf Daten und Datenaggregation ein.

3.1 Grundsätzliches Vorgehen

Regressionsanalysen. Um empirisch zu überprüfen, ob in Folge eines Abrufs von Regelleistung eine Preisbewegung auf dem Intraday-Markt festzustellen ist, verwenden wir multiple OLS-Regressionsanalysen mit zeitlich hoch aufgelösten Daten. „Multiple“ heißt in diesem Kontext, dass wir bei der Berechnung der Korrelation zwischen Preis und Abrufsignal gleichzeitig für eine Vielzahl von möglichen weiteren Variablen statistisch kontrollieren, die einen Einfluss auf den Preis haben und mit dem Regelleistungs-Abruf korreliert sein könnten. Dazu zählen Änderungen der Prognosen von Wind- und Solarerzeugung und der Last sowie die Veröffentlichungen von SRL- und MRL-Abruf und Regelzonensaldo durch die ÜNB nach Ablauf jeder Lieferperiode.

Beobachtungszeitraum. Unsere Analysen decken den Zeitraum 1. Januar 2020 bis 30. Juni 2021 ab, also genau eineinhalb Jahre. In diesem Zeitraum gab es knapp 80 Mio. Transaktionen auf der EPEX-Intraday-Handelsplattform sowie etwa 47 Mio. sekundliche SRL-Sollwerte und 53.000 MRL-Abrufe. Die extrem große Anzahl an Beobachtungen erlaubt uns die Untersuchung einer Vielzahl von Spezifikationen, Kontrollvariablen, zeitlicher Strukturen und nicht-linearer Effekte sowie eine Differenzierung von Produkten und Handelszeitpunkten.

Grenzen der Methodik. Für diese Studie wurden nur öffentlich (wenn auch nicht immer kostenfrei) zugängliche Daten und Informationen verwendet. Insbesondere liegen uns keinerlei Handels- oder Regelleistungsdaten vor, die individuellen Marktteilnehmern zuzuordnen sind. Eine Identifikation einzelner Marktteilnehmer, die auf Basis des Regelleistungsabrufs handeln, ist mit den uns vorliegenden Daten nicht möglich.

3.2 Regressionsmodelle

Wir schätzen verschiedene Varianten des Regressionsmodells

$$P_t = \beta_0 + \beta_1 SRL_t^+ + \beta_2 SRL_t^- + \beta_3 MRL_t^+ + \beta_4 MRL_t^- + \beta_5' Pr_t + \beta_6' V_t + \beta_7 P_{t-15} + \varepsilon$$

wobei P_t der Intraday-Preis ist, SRL_t^+ der Abruf von positiver Sekundärregelleistung und SRL_t^- der von negativer, MRL_t^+ und MRL_t^- der Abruf der Minutenreserve, Pr_t ein Vektor von Wind-, Solar- und Lastprognosen und V_t ein Vektor von Veröffentlichungen von SRL- und

MRL-Abruf sowie des Regelzonensaldos durch die ÜNB, und P_{t-15} der um 15 Minuten verzögerte Preis ist. Unser Augenmerk liegt insbesondere auf den Koeffizienten der Regelleistungs-Abrufe β_1 bis β_4 (blau hervorgehoben), unseren Variablen von Interesse. Prognosen und Veröffentlichungen gehen als Kontrollvariablen ein, um eine erwartungstreue Schätzung dieser Koeffizienten zu ermöglichen. Wir nehmen den zeitverzögerten Preis als Regressor mit auf, da dieser öffentlich bekannt ist und eine Vielzahl von nicht beobachteten Informationen inkorporiert. Die native zeitliche Auflösung von MRL-Abruf, Veröffentlichungen und Prognosen sind Viertelstunden, das SRL-Signal liegt in sekundlicher Auflösung vor. Für die Regressionen verwenden wir eine zeitliche Auflösung t von einer Minute. Datenquellen und Aggregationsverfahren werden im Folgenden dargestellt.

3.3 Daten und Datenaggregation

Preis. Der Intraday-Preis ist die zu erklärende Variable in unserem Regressionsmodell. Alle Preisdaten stammen von der EPEX SPOT. Wir verwenden hierfür die Abweichung des Intraday-Preises von der Vortagsauktion – für Stundenprodukte beziehen wir uns auf die Day-Ahead-Auktion, für Viertelstundenprodukte auf die Intraday-Eröffnungsauktion. Grund hierfür ist, dass die Systembilanz einen Effekt auf kurzfristige Preisveränderungen haben kann, nicht jedoch auf das im Laufe des Jahres schwankende Preisniveau. Im Beobachtungszeitraum fanden knapp 80 Mio. Transaktionen statt, also etwa 1,7 pro Sekunde. Wir konzentrieren unsere Analysen auf die Schlussphase des Handels ab jeweils 2 Stunden vor Lieferbeginn, auf die rund 60% der Beobachtungen entfallen. Für früher stattfindenden Handel sollte die Information über den aktuellen Systemzustand nur wenig Bedeutung haben. Die etwa 47 Mio. berücksichtigten Beobachtungen von Einzeltransaktionen aggregieren wir zu 5,4 Mio. volumengewichteten 1-min-Mittelwerten, jeweils separat für jedes Produkt. Zeiträume, in denen keine Handelsgeschäfte stattgefunden haben (31% aller Minuten), schließen wir aus der Analyse aus. Insgesamt gehen also 5,4 Mio. Beobachtungen in unsere Regressionen ein.

Produkte und Pooling. Im Beobachtungszeitraum liegen rund 66.000 Stunden- und Viertelstundenprodukte; die Preisdaten bestehen also aus ebenso vielen separaten Zeitreihen mit einer jeweiligen Länge von zwei Stunden, von denen zu jedem Zeitpunkt zehn überlappen. Die Beobachtungen für alle Viertelstundenprodukte und Stundenprodukte poolen wir jeweils separat miteinander. Des Weiteren unterscheiden wir den zweistündigen betrachteten Handelszeitraum, also den zeitlichen Abstand zwischen Transaktion und Beginn der Lieferperiode, in Zeitabschnitten von 15 Minuten. Insgesamt unterteilen wir die Preisdaten also in 16 verschiedene Datensätze (acht Handelszeiträume jeweils für Viertelstunden- und Stundenprodukte), für die wir getrennte Regressionen durchführen. Diese 16 Datensätze werden nie gepoolt, gehen also nie gemeinsam in eine Regression ein. Je Regression können wir so bis zu rund 197.000 (Stunde) bzw. 788.000 (Viertelstunde) Beobachtungen nutzen, abzüglich fehlender Beobachtungen z.B. aufgrund von fehlender Handelsaktivität.

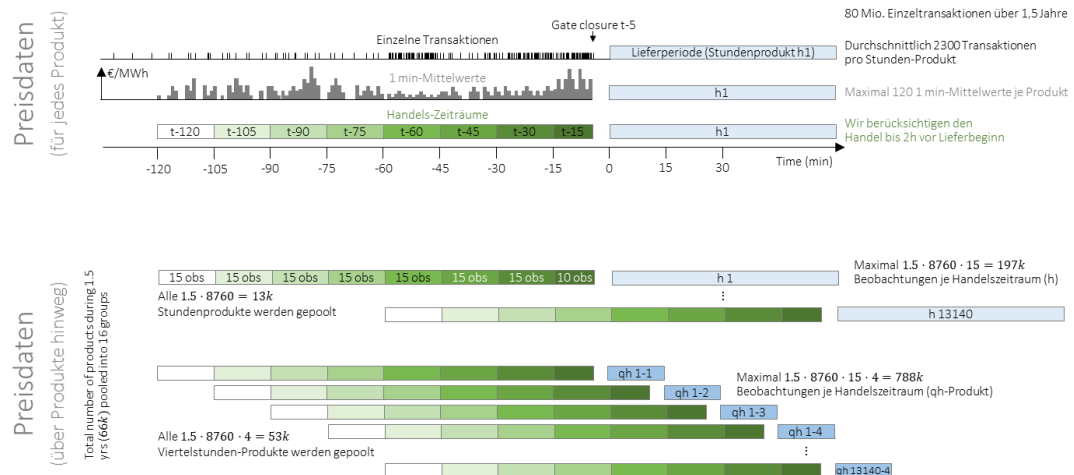


Abbildung 4. Preis-Daten und deren Aggregation.

SRL-Sollwert. Wir berücksichtigen die Abrufe von SRL und MRL, die jeweils als eine kontinuierliche Zeitreihe über den gesamten Beobachtungszeitraum vorliegen. Datenquelle ist die Internetplattform Regelleistung.net, auf der die ÜNB diese Daten am Folgetag veröffentlichen.¹ Das SRL-Sollsignal ist eine sekundlich aufgelöste Zeitreihe im Wertebereich zwischen ca. -2000 und +2000 MW, wobei signifikante Änderungen in der Regel nur alle vier Sekunden stattfinden. Der Untersuchungszeitraum besteht aus gut 47 Mio. Sekunden, für die in 79% der Fälle der SRL-Sollwert vorliegt. Wir aggregieren diese Zeitreihe zu 1-minütlich rollierenden Mittelwerten der jeweils letzten 15 Minuten, so dass die Auflösung der der Preise entspricht.

MRL-Abruf. Der MRL-Abruf erfolgt fahrplanmäßig in Schritten von 15 min. Wir nehmen an, dass der MRL-Abruf jeweils 7 min vor Lieferbeginn erfolgt. Der Beobachtungszeitraum besteht aus knapp 53,000 Viertelstunden, in denen allerdings nur in 2,6% der Fälle MRL abgerufen wurde. Abbildung 5 fasst die Aggregation des Regelleistungs-Abrufs zusammen.

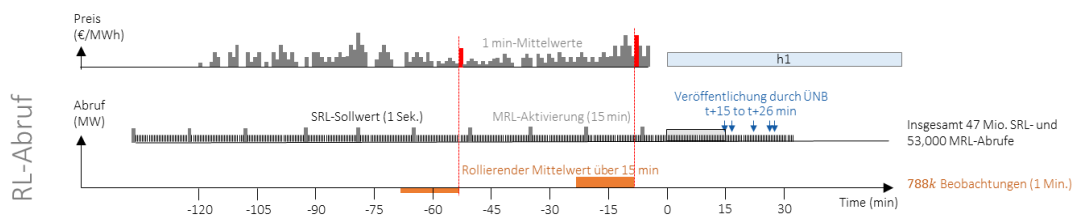


Abbildung 5. Regelleistungs-Abruf-Daten und deren Aggregation.

Prognosen. Als Kontrollvariablen verwenden wir die Prognosen von Wind- und Solarerzeugung des Prognoseanbieters Energy Meteo System sowie Lastprognosen des Anbieters TESLA (Europe) Ltd. Analog zu den Preisen verwenden wir hier ebenfalls Änderungen zur Vortags-Prognose. Alle Prognosen liegen jeweils für jede viertelstündliche Lieferperiode vor und werden

¹ https://www.regelleistung.net/apps/cpp-publisher/api/v1/series/data?periodFrom=2020-01-01&periodTo=2021-06-30&exportFilename=exportedValues.csv&exportFormat=csv&seriesGroupName=GERMANY_aFRR_SETPOINT_MW_PT1S

zudem bis zur Lieferung jede Viertelstunde aktualisiert. Wir passen die Daten der minütlichen Auflösung der Preise an, indem wir für jede Lieferperiode die jeweils aktuelle Prognose bis zum Eintreffen der nächsten Aktualisierung fortschreiben.

Veröffentlichungen. Eine weitere Gruppe von Kontrollvariablen sind die Veröffentlichungen der ÜNB, aus denen sich Rückschlüsse zum Systemzustand ziehen lassen. Dazu gehört der viertelstündliche MRL-Abruf, der viertelstündliche Mittelwert des SRL-Abrufes und der Regelzonen-Saldo. Diese werden von den ÜNB zu unterschiedlichen Zeitpunkten zuerst je Regelzone und abschließend aggregiert für den gesamten Netzregelverbund auf Regelleistung.net veröffentlicht (Tabelle 1). Die Mittelwerte von positiven und negativen Regelleistungsabrufen werden hier separat veröffentlicht und gehen auch separat in unsere Regressionen ein. Wir kontrollieren für alle Einzelveröffentlichungen getrennt, um deren zeitliche Struktur adäquat abzubilden. Wie schon die Prognosedaten bringen wir auch die veröffentlichten Regelleistungsdaten durch Fortschreiben auf eine Auflösung von 1 Minute.

Tabelle 1. Veröffentlichungen durch ÜNB (Minuten nach Beginn der Lieferperiode).

	Transnet	50Hertz	Amprion	TenneT	NRV
RZ Saldo	19 Min	21 Min	25 Min	26 Min	26 Min
SRL	19 Min	21 Min	25 Min	26 Min	26 Min
MRL	15 Min	15 Min	15 Min	15 Min	15 Min

Preis. Als letzte Kontrollvariable geht der Preis als autoregressiver Term ein, also die um 15 Minuten zeitverzögerte zu erklärende Variable.

3.4 Mögliche Störfaktoren der Identifikationsstrategie

Identifikationsstrategie. Systematische Preisbewegungen auf dem Intraday-Markt kurz nach dem Abruf von Regelleistung legen nahe, dass Marktakteure die Information aus dem Abruf für Handelsentscheidungen nutzen. Allerdings gibt es theoretisch auch andere Erklärungen für eine derartige Korrelation.

Kraftwerksausfälle. Ungeplante Ausfälle von Kraftwerken haben wir mangels Verfügbarkeit von entsprechend aufbereiteten Zeitreihen nicht als Regressoren aufgenommen. In dem Maße, in dem Kraftwerksausfälle zum einen in Form von *Urgent Market Messages* dem Markt gemeldet werden und gleichzeitig aufgrund der physikalischen Wirkung im Netz einen SRL-Abruf bewirken, schreibt das Regressionsmodell den Preiseffekt dem SRL-Abruf zu, obwohl in Wirklichkeit ein Teil des Effekts auf der Ausfallmeldung beruhen könnte (*omitted variable bias* durch eine konfundierende Variable). Angesichts der Seltenheit von Kraftwerksausfällen im Vergleich zum Regelleistungs-Abruf halten wir diesen Effekt jedoch für vernachlässigbar. Darüber hinaus können Kraftwerksausfälle natürlich nicht den Preiseffekt des Abrufs von *negativer* Regelleistung erklären.

EE-Erzeugung. Ein ähnlicher Mechanismus könnte vorliegen, wenn Wind- und Solarerzeugern Echtzeit-Messwerte eigener Anlagen vorliegen, die über die verwendeten Prognosedaten hinausgehen: Handelsaktivität, die in Wirklichkeit durch diese Messungen motiviert ist, würde das Modell fälschlicherweise dem praktisch zeitgleich stattfindenden SRL-Abruf zuschreiben. Kurzfristige Änderungen der Erzeugung könnten dabei durch das Wetter oder auch die Abregelung von Anlagen im Rahmen des Einspeisemanagements verursacht sein. Da wir für EE-Erzeugungsprognosen kontrollieren und diese eine Vielzahl von Echtzeit-Messwerten beinhalten, halten wir eine mögliche Verzerrung (*omitted variable bias*) auch hier für nachrangig.

Robustheitsanalyse. Als zusätzliche Robustheitsanalyse untersuchen wir in Abschnitt 4.6, ob auch bei 1-minütlicher Aggregation der SRL-Sollwerte ein Zusammenhang mit den Intraday-Preisen nachzuweisen ist. Dadurch wird der unmittelbare zeitliche Zusammenhang zwischen SRL-Abruf und Preis-Reaktion noch akkurater abgebildet, was eine mögliche Verzerrung aufgrund ausgelassener Variablen vermeiden dürfte. Grundsätzlich gilt: Wenn alle Fundamentalvariablen allen Marktteilnehmern in Echtzeit bekannt wären, würde ein Regelleistungs-Abruf keine zusätzliche Information beinhalten und hätte somit keinen Effekt auf den Preis. Wenn jedoch ein zeitlicher Zusammenhang zwischen Regelleistungs-Abruf und Intraday-Preis besteht, hat die Information über den Abruf potenziell einen wirtschaftlichen Wert für den Händler.

3.5 Bewertungs-Metriken

Metriken. Um den Einfluss des Regelleistungs-Abrufs auf den Intraday-Preis zu bewerten, betrachten wir insbesondere drei Arten von Ergebnissen: (1) Die Höhe der Koeffizienten, ob also ein wirtschaftlich bedeutsamer Einfluss besteht; (2) die statistische Signifikanz der Koeffizienten, ob also ein Zusammenhang aus rein zufälligen Preisschwankungen stammen könnte; (3) die Erklärungskraft der Modelle mit und ohne Regelleistungs-Abruf. Für Letzteres vergleichen wir die korrigierten R^2 von ansonsten identischen Modellen, in denen der SRL- und MRL-Abruf als Regressor eingeschlossen ist bzw. dies nicht der Fall ist.

Robustheit. Darüber hinaus bewerten wir die Robustheit der Ergebnisse daran, ob die Metriken (1), (2) und (3) sich bei Änderung von Modellspezifikationen stabil verhalten sowie anhand der Konsistenz und internen Plausibilität der Ergebnisse insgesamt, also etwa der Struktur der Koeffizienten von Regelleistungs-Abruf und Kontrollvariablen.

4 Ergebnisse

Wir diskutieren zunächst die Ergebnisse unserer Basisspezifikation, gefolgt von einer Reihe von weiterführenden Analysen und Robustheitstests.

4.1 Basisspezifikation

Die Basisspezifikation verwendet alle genannten Kontrollvariablen, den positiven und negativen SRL- und MRL-Abruf sowie den um 15 Minuten verzögerten Preis. Der Regelleistungsabruf geht linear ein, und der gesamte Datenbereich von anderthalb Jahren wird zur Schätzung genutzt. Stunden- und Viertelstundenkontrakte sowie die acht Handelszeiträume schätzen wir wie immer getrennt.

4.1.1 Kurzfristigster Handel

Kurzfristigster Handel. Zunächst stellen wir hier den Einfluss des Regelleistungs-Abrufs auf den Preis im kurzfristigsten Handel dar. Für diese Regressionen wurden also nur diejenigen Handelsgeschäfte berücksichtigt, die zwischen 15 Minuten und 5 Minuten vor Lieferbeginn des jeweiligen Produkts lagen. Betrachtet wird hier also nur der Handel des jeweiligen Front-Produkts.

Darstellung. Abbildung 6 zeigt die Koeffizienten des SRL- und MRL-Abrufs auf den Preis von Stunden- (links) und Viertelstundenprodukten (rechts), die aus zwei getrennten Regressionen stammen. Die Balken zeigen dabei die Größe der Koeffizienten, die Klammer stellt das 99%-Konfidenzintervall dar.

SRL-Abruf. Diese Schätzung legt nahe, dass ein positiver SRL-Abruf von 15 Minuten Dauer in Höhe von 1000 MW den Strompreis des kurz vor Lieferung stehenden Stundenprodukts im Mittel um 14 €/MWh und den Preis des Viertelstundenkontrakts um 34 €/MWh anhebt. Diese Koeffizienten sind statistisch hoch signifikant. Wir können mit einer Konfidenz von weit mehr als 99,99% ausschließen, dass diese Schätzung auf zufällige Preisbewegungen zurückzuführen ist.² Beim Abruf von negativer SRL identifizieren unsere Schätzungen einen deutlich kleineren, jedoch ebenfalls statistisch hoch signifikanten Effekt. Der sofortige Effekt eines GW-Abrufs ist -8 €/MWh auf den Stundenkontrakt sowie -16 €/MWh auf die Viertelstunde.

MRL-Abruf. Der Effekt eines Abrufs positiver MRL ist noch wesentlich ausgeprägter als der von SRL. Ein GW-Abruf erhöht den Preis des Viertelstundenkontrakts kurz vor Lieferung um etwa 104 €/MWh. Jedoch sind die Konfidenzintervalle hier deutlich breiter als bei der SRL, der Effekt auf Stundenkontrakte ist auf dem 99%-Niveau nicht statistisch signifikant. Aus diesem Grund und weil MRL-Abrufe wesentlich seltener als SRL-Abrufe stattfinden, konzentrieren wir uns in den folgenden Abschnitten dennoch auf Letztere. Die geringere Bedeutung von MRL als Preistreiber reflektiert sich auch in der nur kleinen Verbesserung der Erklärungskraft des Modells bei Aufnahme von MRL als Regressor (siehe Abbildung 12 unten).

² Der P-Wert der Koeffizienten liegt bei $1.3 \cdot 10^{-161}$ oder darunter.

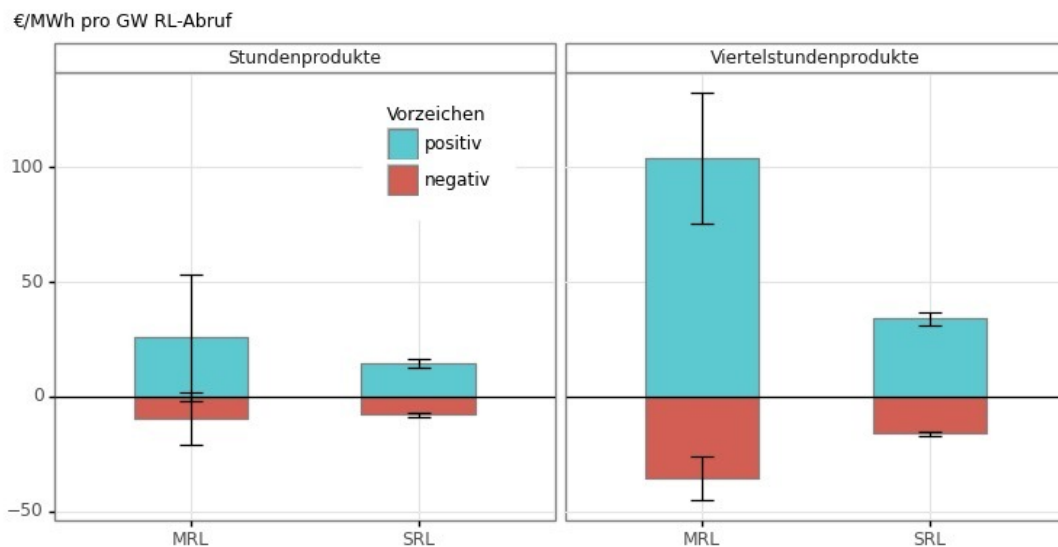


Abbildung 6. Effekt von Regelleistungs-Abruf auf den Intraday-Preis der Front-Produkte. Dargestellt werden als Balken die Koeffizienten der SRL- und MRL-Abrufe ($\hat{\beta}_1$ bis $\hat{\beta}_4$) aus zwei getrennten Regressionen für Stunden- (links) und Viertelstundenprodukte (rechts). Die Klammer stellt das 99%-Konfidenzintervall dar. Es zeigt sich ein statistisch hoch signifikanter Zusammenhang, außer im Fall von MRL bei Stundenprodukten. Ein 15-minütiger positiver SRL-Abruf von 1000 MW erhöht den QH-Preis um 34 €/MWh, den H-Preis um 15 €/MWh.

Struktur der Ergebnisse. Die Struktur der Ergebnisse ist plausibel:

- Der Effekt auf Viertelstundenprodukte ist stärker als der auf Stundenprodukte. Dies ist naheliegend, da der Regelleistungsabruf Informationen über den *aktuellen* Systemzustand transportiert und die Lieferperiode der Stundenprodukte sich weiter in die Zukunft erstreckt.
- Der Effekt eines MRL-Abrufs ist stärker als der eines SRL-Abrufs. Dies ist plausibel, da MRL wegen der im Beobachtungszeitraum höheren Regelarbeitspreise selten und nur bei größeren Systemungleichgewichten aktiviert wird. Dies ist auch konsistent mit dem Ergebnis, dass ein großer SRL-Abruf einen überproportionalen Effekt hat (Abschnitt 4.2): Ein positiver MRL-Abruf hat pro MW in etwa den gleichen Preiseffekt wie ein großer SRL-Abruf pro MW.
- Ein positiver Abruf verursacht einen größeren Preiseffekt als ein Abruf von negativer SRL. Dies lässt sich dadurch erklären, dass ein negativer Abruf eine Überspeisung des Systems mit Strom bedeutet. Wind- und Solarerzeuger lassen sich, anders als konventionelle Kraftwerke, problemlos, schnell und ohne Kosten herunterregeln. Fällt der Strompreis unterhalb die negative Marktprämie, ist es für Direktvermarkter vorteilhaft, Anlagen abzuregeln anstatt Strom zu verkaufen. Direktvermarkter können also bei stark negativen Preisen auf ein Verkaufen von Strom verzichten. Eine analoge Handlungsoption bei einer Unterdeckung des Systems besteht nicht, da thermische Kraftwerke in der Kürze der Zeit nicht hochgefahren werden können.
- Die Koeffizienten der meisten Kontrollvariablen sind statistisch hoch signifikant und hinsichtlich Vorzeichen und Größenordnung plausibel (Tabelle 2). Erhöht sich die Wind- oder Solarprognose beispielsweise um 1 GW, fällt der Intraday-Preis um 0,6

€/MWh. Die Koeffizienten der ÜNB-Veröffentlichungen ergeben kein ganz konsistentes Bild und sind auch zum Teil statistisch insignifikant, was wir auf die große Anzahl kurz hintereinander stattfindender Veröffentlichungen sowie die hohe Korrelation untereinander zurückführen. Als Robustheitsanalyse haben wir die Veröffentlichungen einzeln und komplett aus der Regression entfernt (Abschnitt 4.6). Als Konsequenz werden die Koeffizienten des SRL-Abrufs noch etwas größer, das Ergebnis ist also robust.

- Die Koeffizienten des Regelleistungs-Abrufs sind absolut etwa zwei Größenordnungen größer als die Erzeugungsprognosen, obwohl sie in beiden Fällen auf eine Über-/Unterdeckung des Systems von 1 GW hinweisen. Dies deutet darauf hin, dass der Regelleistungs-Abruf von Marktteilnehmern als ein sehr viel robusteres Informationssignal wahrgenommen wird.

Tabelle 2. Regressionskoeffizienten für das Front-Viertelstundenprodukt auf Basis von 342.349 Beobachtungen.

Variable		Geschätzter Effekt auf den ID-Preis (€/MWh)	P-Wert
RL-Abruf (GW)	Positiver SRL-Abruf	33,9	<0,0001
	Negativer SRL-Abruf	-16,2	<0,0001
	Positiver MRL-Abruf	104,0	<0,0001
	Negativer MRL-Abruf	-35,8	<0,0001
Prognosen (GW)	Wind-Prognose	-0,6	<0,0001
	Solar-Prognose	-0,6	<0,0001
	Last-Prognose	-0,2	<0,0001
ÜNB-Veröffentlichungen (GW)	Positiver SRL-Abruf TBW	-4,8	0,0239
	Positiver SRL-Abruf TBW+50H	6,0	0,0007
	Positiver SRL-Abruf TBW+50H+AMP	0,0	0,0220
	Positiver SRL-Abruf NRV	-1,6	0,2136
	Negativer SRL-Abruf TBW	-0,3	0,7413
	Negativer SRL-Abruf TBW+50H	-2,8	<0,0001
	Negativer SRL-Abruf TBW+50H+AMP	0,0	<0,0001
	Negativer SRL-Abruf NRV	2,1	<0,0001
	Positiver MRL-Abruf NRV	-33,8	<0,0014
	Negativer MRL-Abruf NRV	18,9	<0,0001
	Positiver NRV-Saldo	5,7	<0,0001
	Negativer NRV-Saldo	-5,2	<0,0001
Andere	Preis _{t-15} (€/MWh)	0,7	<0,0001
	Konstante (€/MWh)	-1.7	<0,0001

4.1.2 Gesamter Handelszeitraum

Handelszeitpunkte. Während bisher nur der allerkurzfristigste Handel betrachtet wurde, diskutieren wir nun den Effekt von Regelleistungs-Abruf auf Strompreise für Handelszeitpunkte bis zu zwei Stunden vor Lieferbeginn. Der Regelleistungs-Abruf transportiert Informationen über den aktuellen und kurzfristig erwarteten Systemzustand. Deswegen ist zu erwarten, dass der Effekt auf Preise bei einer kurzen Lieferfrist größer ist. Liegt der Lieferbeginn beispielsweise noch zwei Stunden in der Zukunft, hat eine Information über den aktuellen Systemzustand nur wenig Bedeutung für den Systemzustand während der Lieferung.

Methodik und Darstellung. Wir unterteilen die Preisdaten in acht Zeitfenster von je 15 Minuten. Wie immer werden Stunden- und Viertelstundenprodukte getrennt geschätzt, so dass insgesamt 16 Regressionen gerechnet werden. Abbildung 7 zeigt die Koeffizienten des SRL-Abrufs. Auf der X-Achse sind die Effekte auf Preise einer Reihe von Produkten dargestellt, die unterschiedlich lange vor Lieferung stehen.

Ergebnisse. Ein SRL-Abruf hat einen statistisch hoch signifikanten Effekt auf die Intraday-Preise im gesamten Kurzfristhandel von Produkten bis zwei Stunden vor Lieferung. Mit anderen Worten: Ein 15-minütiger positiver SRL-Abruf in Höhe von 1000 MW hebt nicht nur den Preis des Front-Viertelstundenkontrakts um 34 €/MWh, sondern darüber hinaus das Produkt mit Lieferung im Anschluss um 20 €/MWh, den dahinter liegenden Kontrakt um 14 €/MWh etc. – und selbst das Produkt mit Lieferung in zwei Stunden noch um 3 €/MWh. Darüber hinaus hebt der gleiche Abruf nicht nur den Preis des Front-Stundenkontrakts um 8-17 €/MWh, sondern auch den des Folgeproduktes um 2-4 €/MWh. Abbildung 7 zeigt also, dass ein SRL-Abruf gleichzeitig den Preis von allen 10 aktuell gehandelten Kontrakten mit Lieferbeginn in den nächsten zwei Stunden beeinflusst. Alle Koeffizienten sind statistisch hoch signifikant.

Struktur der Ergebnisse. Die Ergebnisse bestätigen die Vermutung: Liegt die Lieferung noch weiter in der Zukunft, hat der SRL-Abruf einen quantitativ kleineren Effekt.

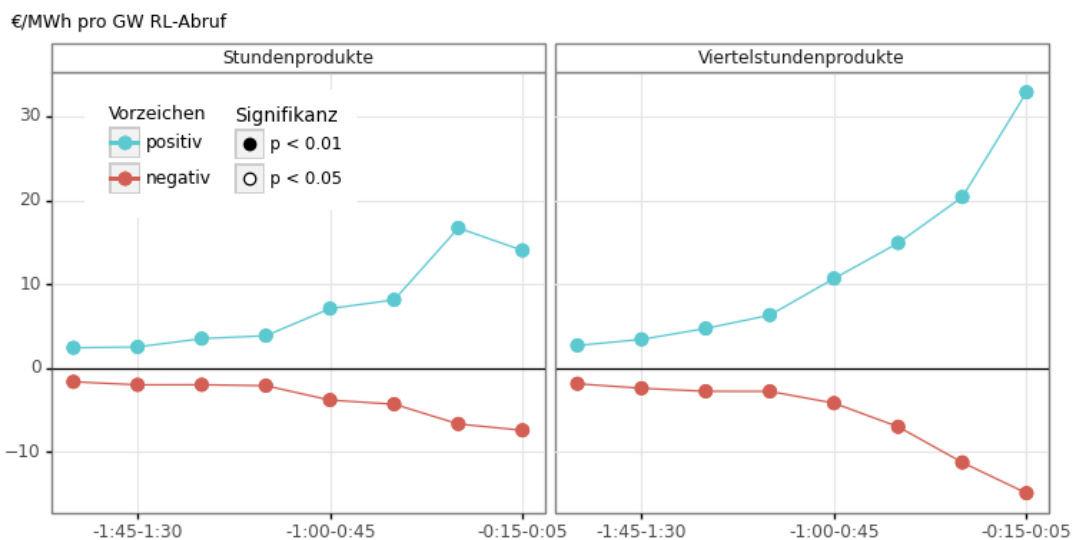


Abbildung 7. Die Effekte des SRL-Abrufs auf den Intraday-Preis zu verschiedenen Handelszeitpunkten für Stunden- und Viertelstundenprodukte. Gezeigt werden die Koeffizienten des SRL-Abrufs ($\hat{\beta}_1$ und $\hat{\beta}_2$) aus 16 verschiedenen Regressionen. Gefüllte Kreise zeigen eine Signifikanz auf dem 1%-Niveau. Ein SRL-

Abruf hat einen statistisch hoch signifikanten Einfluss auf alle 16 betrachteten Intraday-Produkte, also alle Kontrakte mit Lieferbeginn in den kommenden zwei Stunden. Die Preise von kurz vor Lieferung stehenden Kontrakten reagieren am stärksten.

Zusammenfassung. Es besteht ein statistisch hoch signifikanter Zusammenhang zwischen Regelleistungs-Abruf und Intraday-Preis. In Folge eines Abrufs von positiver Regelleistung steigt der Preis, bei negativer Regelleistung fällt er. Dieser Zusammenhang ist nachweisbar, obwohl wir für eine Vielzahl weiterer Preistreiber statistisch kontrollieren. Der Preiseffekt besteht dabei nicht nur für das Front-Produkt, sondern auch für Produkte, deren Lieferbeginn bis zu zwei Stunden in der Zukunft liegen. Anders ausgedrückt ist ein SRL-Abruf Preistreiber für eine ganze Reihe aktuell gehandelter Intraday-Produkte.

4.2 Nicht-linearer Effekt

Nicht-lineare Effekte. In der Basisspezifikation gehen der SRL- und MRL-Abruf linear ein, d.h. wir nehmen an, dass jeder MW-Abruf immer den gleichen €/MWh-Effekt auf den Preis hat, auch wenn der Effekt zeitverzögert auftreten kann und sich für verschiedene momentan gehandelte Produkte unterscheidet. In diesem Abschnitt untersuchen wir, ob (a) ein größerer Abruf einen überproportional großen Preiseffekt bewirkt und ob (b) das Umspringen von einem negativen zu einem positiven Abruf, und umgekehrt, einen zusätzlichen Preiseffekt hat.

Größe des Abrufs. Die absolute Größe des Abrufs könnte deswegen eine Rolle spielen, da die Arbeitspreis-Merit-Order in der Regel hochgradig nicht-linear ist. Als Konsequenz steigt der (erwartete) reBAP dann überproportional an, wenn ein volumenmäßig großer Abruf getätigt wird. Tabelle 3 zeigt die Häufigkeit von SRL-Abrufen nach Größe im Beobachtungszeitraum.

Tabelle 3. Anzahl der 1-minütlich rollierenden 15-Minuten-Mittelwerte der SRL-Abrufe nach Größe.

Bereich	Anzahl	Anteil
< -1500	192	0.03%
-1500 bis -1000	2905	0.41%
-1000 bis -500	31285	4.41%
-500 bis 0	328229	46.29%
0	0	0.00%
0 bis 500	315878	44.55%
500 bis 1000	26260	3.70%
1000 bis 1500	3780	0.53%
>1500	500	0.07%
Total	709029	100.00%

Ergebnisse. Abbildung 8 zeigt den Preiseffekt differenziert nach Größe des SRL-Abrufs. Die Ergebnisse zeigen, dass große Abrufe positiver SRL einen stark überproportionalen Preiseffekt haben. Ein kleiner Abruf hat im Mittel auf das Viertelstunden-Frontprodukt (in der Abbildung ganz rechts) einen Preiseffekt von 26 €/MWh je GW Abruf, ein sehr großer Abruf hat einen

Effekt von 118 €/MWh. Dies bedeutet, dass in Folge eines 150 MW-Abrufs der Preis um 3,90 €/MWh steigt, in Folge eines 1500 MW-Abrufs aber um 177 €/MWh. Bei Abruf negativer SRL ist kein bedeutsamer nicht-linearer Effekt feststellbar – wenn überhaupt ein Unterschied besteht, scheint hier ein größerer Abruf tendenziell einen unterproportionalen Preiseffekt zu bewirken.

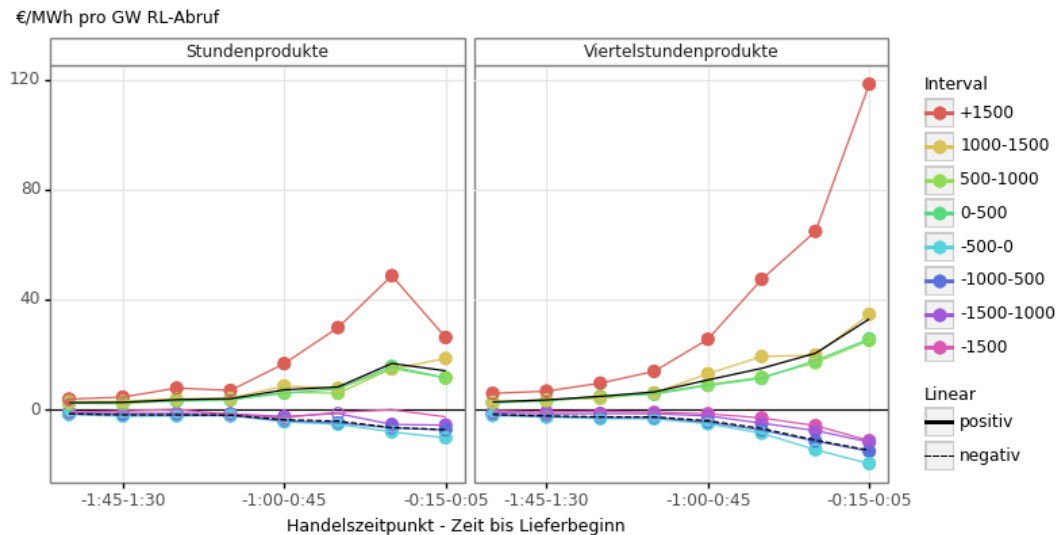


Abbildung 8. Effekt eines SRL-Abrufs differenziert nach Größe des Abrufs. Großvolumige Abrufe von positiver SRL haben einen stark überproportionalen Effekt. Jedoch haben auch kleine SRL-Abrufe in fast allen betrachteten Handelsperioden einen messbaren und auf dem 1%-Niveau signifikanten Preiseffekt.

Vorzeichenwechsel. Es ist denkbar, dass in bestimmten Situationen ein Regelleistungs-Abruf mehr preisrelevante Informationen in sich trägt als in anderen. Ein Fall könnte der Wechsel vom Abruf von positiver zu negativer Regelleistung sein, und umgekehrt. Hier deutet sich ein Umschwung des Systems an. Abbildung 9 zeigt die Koeffizienten einer zusätzlich eingefügten Binärvariable „Vorzeichenwechsel“, die angibt, ob der 15 min-Mittelwert des SRL-Abrufs von Minus auf Plus oder umgekehrt wechselt. Es findet sich in einigen Handelsperioden ein statistisch signifikanter Effekt. Dies zeigt, dass bei einem Vorzeichenwechsel der Intraday-Preis stärker reagiert, als der Abruf anhand seiner absoluten Größe vermuten ließe. Dieser Effekt ist zusätzlich zum „normalen“ Effekt des SRL-Abrufs. Allerdings ist die Größe der Koeffizienten mit 1-2 € eher klein.

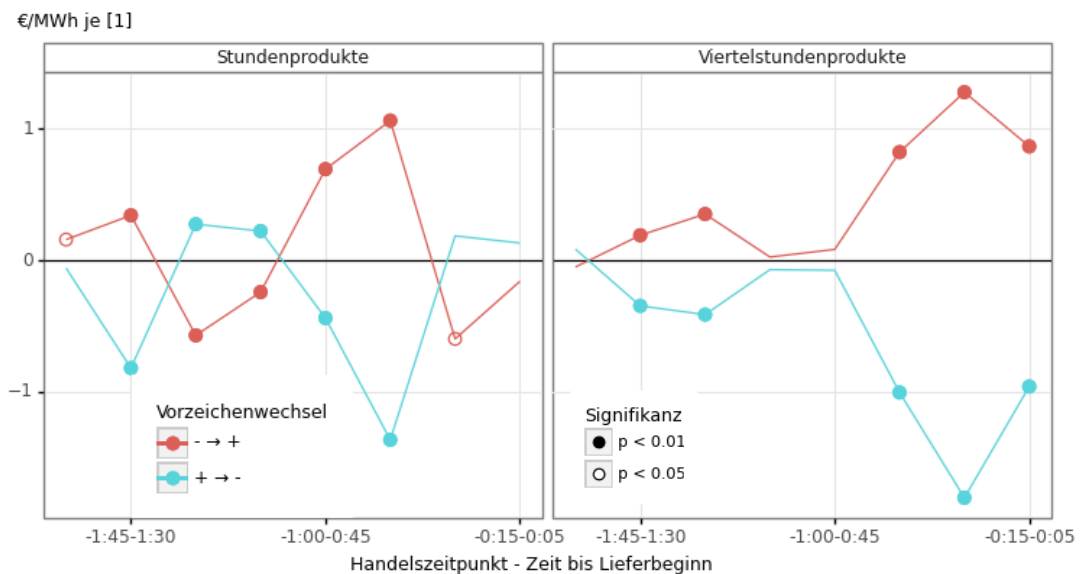


Abbildung 9. Effekt eines Vorzeichenwechsels des SRL-Abrufs auf das Front-Viertelstundenprodukt. Ein Vorzeichenwechsel hat einen statistisch signifikanten, jedoch quantitativ kleinen Zusatzeffekt auf den Intraday-Preis.

4.3 Einfluss des Regelarbeitsmarkts

Einfluss des Regelarbeitsmarkts. Am 3. November 2020 wurde in Deutschland der Regelarbeitsmarkt (RAM) eingeführt, also die Möglichkeit eröffnet, Regelenergie ohne vorherige Bezuschlagung in der Regelleistungsauktion anzubieten. Entgegen der Intention der Reform stiegen daraufhin insbesondere die Preise für Regularbeit an. Höhere Regularbeitspreise übersetzen sich in höhere Ausgleichsenergiepreise, die wiederum einen Einfluss auf die Bedeutung von Regelleistungs-Abrufsignalen für den Kurzfristhandel haben könnten.

Analysen. Um einen möglichen Einfluss zu untersuchen, haben wir den Zeitraum in zwei Abschnitte unterteilt – bis 2. November 2020 und ab 3. November 2020 – und diese getrennt durch eine Regression in der Basisspezifikation untersucht, analog zu Abschnitt 4.1.2. In allen drei Zeitabschnitten – vor Einführung des RAM, nach Einführung des RAM und im Gesamtzeitraum – finden wir einen statistisch signifikanten Effekt von SRL-Abruf auf Intraday-Preis im gesamten Handelszeitraum zwei Stunden vor Lieferung (Abbildung 10). Tatsächlich hat die Einführung des RAM den Zusammenhang im Kurzfristhandel verstärkt.

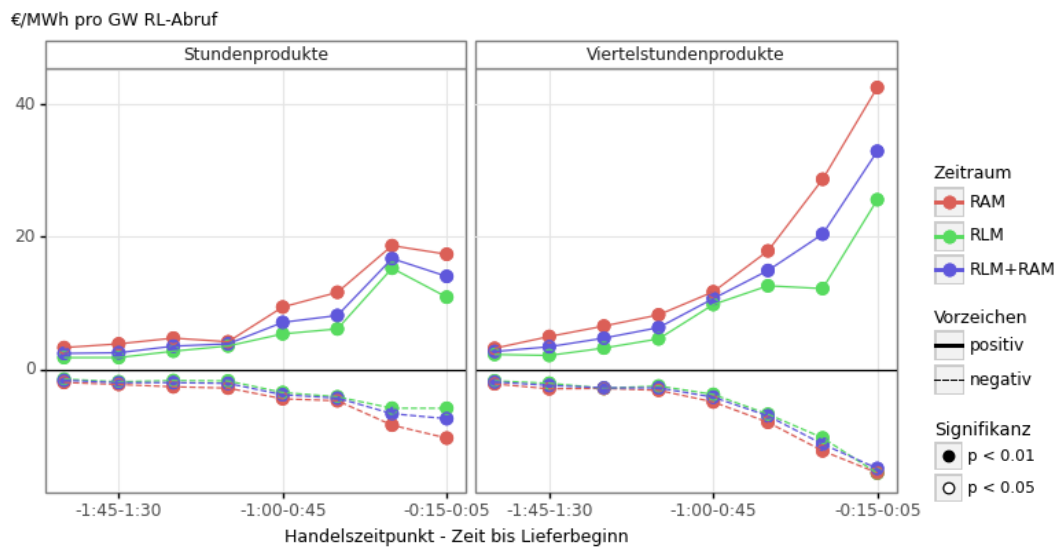


Abbildung 10. Preiseffekt des SRL-Abrufs ($\hat{\beta}_1$ und $\hat{\beta}_2$) auf Stunden- und Viertelstundenkontrakte zu verschiedenen Handelszeitpunkten vor und nach der Einführung des Regelarbeitsmarkts. Seit der Einführung des RAM ist der Zusammenhang noch stärker, war jedoch auch schon davor in allen betrachteten Fällen statistisch signifikant.

4.4 Auto-regressiver Preis

Analysen. In den bis hier gezeigten Regressionen geht der Preis zeitverzögert um 15 Minuten ein. Im Folgenden überprüfen wir nun die Rolle des Preises, in dem wir ihn (a) um 60 Minuten zeitverzögert oder (b) gar nicht als Regressor ins Modell mit aufnehmen. Abbildung 11 zeigt die Koeffizienten des SRL-Abrufs in den drei Regressionsmodellen im Vergleich. Die Aufnahme des Preises als Regressor und auch die Wahl der Zeitverzögerung hat nur geringen Einfluss auf die Größe der Koeffizienten. Ohne Preis als erklärende Variable sind die Koeffizienten insbesondere bei Stundenkontrakt noch etwas höher als bisher geschätzt.

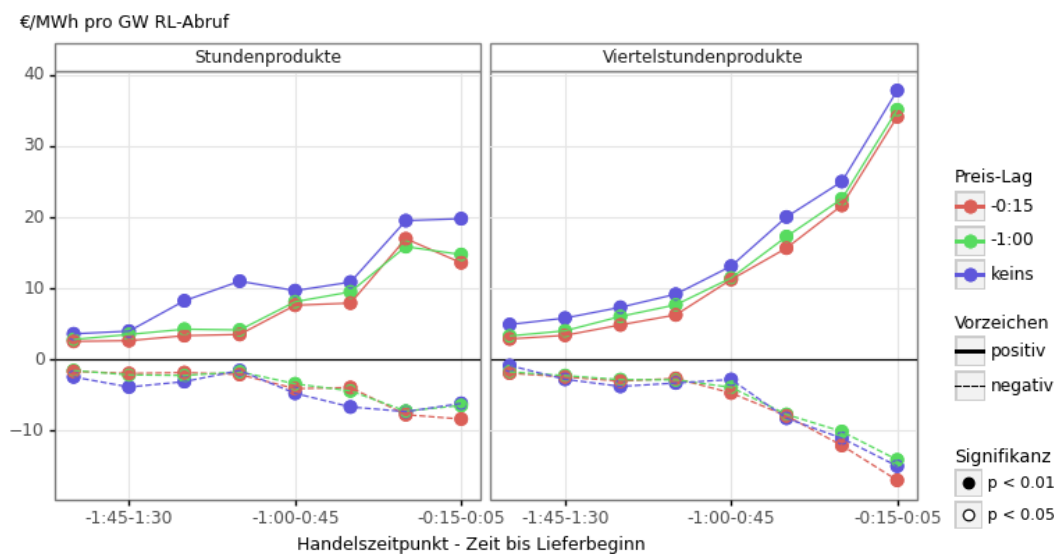


Abbildung 11. Preiseffekt des SRL-Abrufs auf Stunden- und Viertelstundenkontrakte zu verschiedenen Handelszeitpunkten in Regressionsmodellen mit und ohne zeitverzögertem Preis als Regressor sowie mit 15min oder 60min Zeitverzögerung. Die roten Linien sind identisch Abbildung 7. Insgesamt hat der Preis als Regressor nur einen geringen Einfluss auf die Koeffizienten des SRL-Abrufs, die Ergebnisse sind also robust.

4.5 Erklärungskraft

Modell-Fit. Statt Größe und statistische Signifikanz der Koeffizienten von SRL- und MRL-Abruf zu betrachten, lässt sich auch die Erklärungskraft des Regressionsmodells als Ganzes vergleichen. Hierbei interessiert uns insbesondere, ob die Erklärungskraft des Regressionsmodells dadurch ansteigt, dass der Regelleistungs-Abruf als Regressor mit aufgenommen wird. Dafür betrachten wir das korrigierte R^2 – den Anteil der Varianz des Intraday-Preises, der vom Modell erklärt werden kann – für vier Regressionsmodelle, die sich nur darin unterscheiden, dass der Regelleistungs-Abruf in unterschiedlicher Form im Modell berücksichtigt wird: gar nicht, nur MRL, nur SRL und MRL und SRL. Das korrigierte R^2 eignet sich, anders als das (nicht korrigierte) R^2 , für den Vergleich von Modellen mit einer unterschiedlichen Anzahl von Regressoren.

Ergebnisse. Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse, von denen im Wesentlichen zwei von Relevanz sind. Zum einen steigt die Erklärungskraft der Modelle deutlich an, wenn Regelleistung einbezogen wird. Am stärksten ist der Anstieg im kurzfristigen Handel. Für Handel bis 15 Minuten vor Lieferbeginn hebt die Aufnahme der Regelleistungs-Abrufe in das Regressionsmodell das korrigierte R^2 von 64% auf 75% (Stundenkontrakt) bzw. von 51% auf 55% (Viertelstundenkontrakt). Dieser erhebliche Anstieg des Modell-Fit zeigt, dass ein bedeutsamer Teil der Preisänderungen im Kurzfristhandel durch Regelleistungsabrufe bedingt sind. Zum anderen ist dieser Anstieg fast ausschließlich durch den SRL-Abruf zu erklären. Der MRL-Abruf führt nur zu einer marginalen Verbesserung des Modell-Fit, was dadurch zu erklären ist, dass nur in 2,6% aller Viertelstunden überhaupt MRL aktiviert wurde.

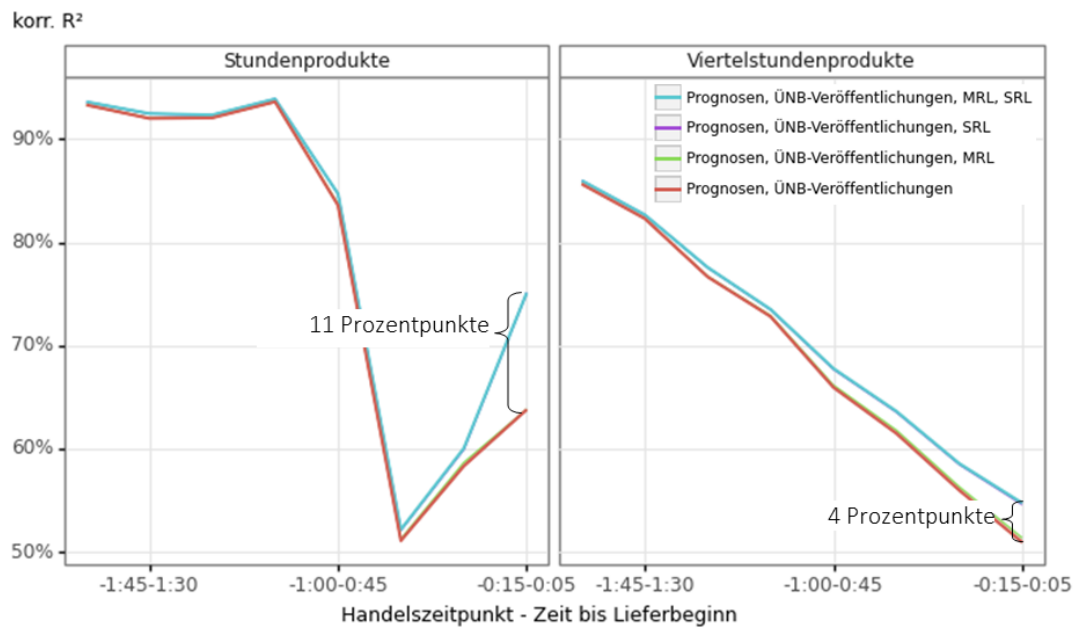


Abbildung 12. Erklärungskraft von ansonsten identischen Regressionsmodellen mit und ohne MRL/SRL-Abruf. Dargestellt ist das korrigierte R^2 aus insgesamt 64 Regressionen. Die Aufnahme des Regelleistungs-Abrufes als erklärende Variable hebt den R^2 -Wert der Modelle deutlich an, beim kurzfristigen Handel von Stundenprodukten von 64% auf 75%. Dabei bewirkt die Aufnahme des SRL-Abrufs als erklärende Variable einen sehr viel deutlicheren Anstieg des korrigierten R^2 als der MRL-Abruf. Auch deswegen konzentrieren wir uns auf den SRL-Abruf.

Unterschiede im R^2 . Abbildung 13 zeigt die *Differenz* des korrigierten R^2 zwischen Modellen mit und ohne Regelleistung als Regressoren. Gezeigt wird also der *Anstieg* des korrigierten R^2 durch die Aufnahme von SRL und MRL als erklärende Variable. Hierbei zeigt sich, dass der Modell-Fit substantiell verbessert wird, insbesondere im Kurzfristhandel, dass also der Regelleistungs-Abruf ein wichtiger Preistreiber ist. Dargestellt ist außerdem diese Differenz für verschiedene autoregressive Preisterme. Es zeigt sich, dass diese Verbesserung weitgehend unabhängig davon ist, ob ein zeitverzögerter Preis im Modell Eingang findet (und um wie lange zeitverzögert). Mit anderen Worten: Unser zentrales Ergebnis ist robust – der Abruf von Regelleistung ist ein wichtiger Preistreiber im kurzfristigen Intraday-Handel.

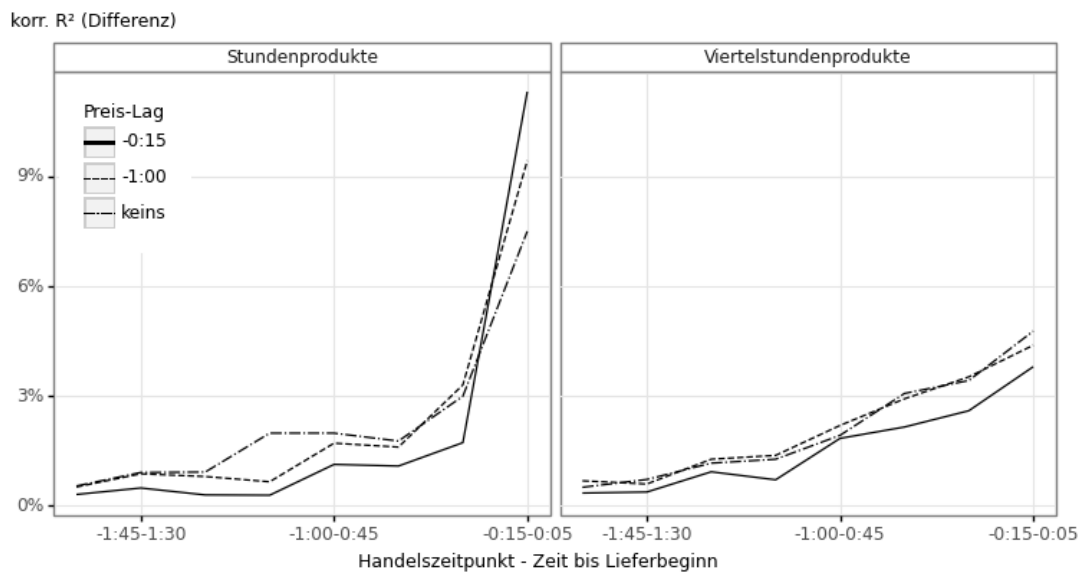


Abbildung 13. Differenz des korrigierten R^2 zwischen Modellen mit und ohne Regelleistungs-Abruf. Die Aufnahme der RL-Abrufs erklärenden Variablen erhöht das R^2 um 8-11 Prozentpunkte (Stundenprodukt) bzw. 4-5 Prozentpunkte (Viertelstundenprodukt) für Produkte kurz vor Lieferung. Dieser Anstieg des R^2 findet sich in Modellen, die den zeitverzögerten Regressor beinhalten genauso wie in der Basisspezifikation ohne autoregressiven Preis. Unsere Ergebnisse sind also robust: Regelleistungs-Abruf ist ein relevanter Preistreiber im Kurzfristhandel.

4.6 Weitere Robustheits-Analysen

1 min-SRL. Anstatt einer Mittelwertbildung von 15 Minuten verwenden wir hier den 1-min-Mittelwert des SRL-Signals als Regressor. Dies hat den Vorteil, dass der unmittelbare zeitliche Zusammenhang zwischen SRL-Abruf und Preis-Reaktion noch akkurater abbildbar ist, was eine mögliche Verzerrung aufgrund ausgelassener Variablen vermeiden dürfte. Andererseits sind auf diese Weise nur solche Preiseffekte messbar, die sich in kurzer Zeit realisieren. Wenn Handelsentscheidungen nicht in der gleichen Minute erfolgen oder die Handelsaktivität erst später stattfindet, wird so ein Zusammenhang übersehen. Im Ergebnis sind die Regressionskoeffizienten des SRL-Abrufs um etwa ein Drittel geringer als bei der Basisspezifikation. Ein positiver SRL-Abruf in Höhe von 1000 MW mit einer Dauer von *einer Minute* hat beispielsweise einen geschätzten Preiseffekt auf das Viertelstunden-Frontprodukt von 21 €/MWh, während ein *15-minütiger* Abruf einen geschätzten Effekt von 34 €/MWh hat. Pro Minute gerechnet ist also der Preiseffekt bei 1-Minuten-Mittelwerten sogar neunmal stärker.

Reduzierte Regressionsmodelle. Die Koeffizienten von einigen Kontrollvariablen haben unerwartete Vorzeichen. Dies betrifft insbesondere die ÜNB-Veröffentlichungen, was wir uns durch die hohe Kollinearität der in enger zeitlicher Folge veröffentlichten Werte erklären. Da die Veröffentlichungen natürlich auch stark mit dem Regelleistungs-Abruf korreliert sind, entfernen wir sie als Robustheitsanalyse einzeln und gemeinsam aus dem Regressionsmodell. Die Koeffizienten des Regelleistungs-Abrufs bleiben dabei in Vorzeichen, Größe und statistischer

Signifikanz stabil, das Ergebnis ist also robust. Die SRL-Koeffizienten werden im Modell mit Viertelstundenprodukten sogar noch absolut größer.

5 Schlussfolgerungen

Ergebnisse. Wir finden einen statistisch signifikanten, quantitativ bedeutsamen und überaus robusten Zusammenhang zwischen Regelleistungs-Abruf und Intraday-Preisen. Kurz nach SRL- und MRL-Abrufen kommt es systematisch zu Preisbewegungen, wobei sich die Preise nach Abruf positiver Regelleistung nach oben bewegen, nach dem Abruf von negativer Regelleistung nach unten. Diese Preisbewegungen sind bei allen Stunden- und Viertelstundenprodukten festzustellen, deren Lieferung maximal zwei Stunden in der Zukunft liegt. Die Ergebnisse sind dabei so auffällig, dass wir in einer Vielzahl von Spezifikationen mit einer Konfidenz von mehr als 99,99% ausschließen können, dass Preissprünge auf zufällige Schwankungen zurückzuführen sind.

Beispiel. Findet beispielsweise um 11:35 ein SRL-Abruf von 1000 MW statt, der 15 Minuten andauert, so ist nach unseren Schätzungen der Strompreis um 12:50 für die Lieferung von 12:00-12:10 im Mittel um 34 €/MWh höher als wenn der Abruf nicht stattfindet. Dieser SRL-Abruf hat darüber hinaus einen Einfluss auf die Preise für alle weiteren Stunden- und Viertelstundenkontrakte mit Lieferbeginn zwischen 12:00 und 14:00.

Unterschiede. Der Effekt ist dabei tendenziell umso größer, je kürzer der zeitliche Abstand zwischen dem Zeitpunkt des Abrufs und dem des Handels ist, je kurzfristiger der Handel vor Lieferbeginn stattfindet und je höher der Abruf ausfällt. Der Effekt ist außerdem bei Viertelstundenprodukten größer als bei Stundenprodukten, bei positiven Regelennergieabrufen stärker als bei negativen und bei SRL-Abruf stärker als bei MRL-Abruf. Seit der Einführung des Regelarbeitsmarkts hat sich der Einfluss noch verstärkt. Jedoch finden wir selbst in Fällen mit quantitativ kleinerem Effekt oft einen statistisch signifikanten Zusammenhang.

Interpretation. Im Ergebnis ergibt sich ein konsistentes Bild von robusten Zusammenhängen. Diese Korrelationen legen nahe, dass Markttakteure die Information aus dem Regelleistungs-Abruf für Handelsentscheidungen nutzen.

Appendix

Im Folgenden sind die Ergebnisse weiterer durchgeführter Analysen dargestellt.

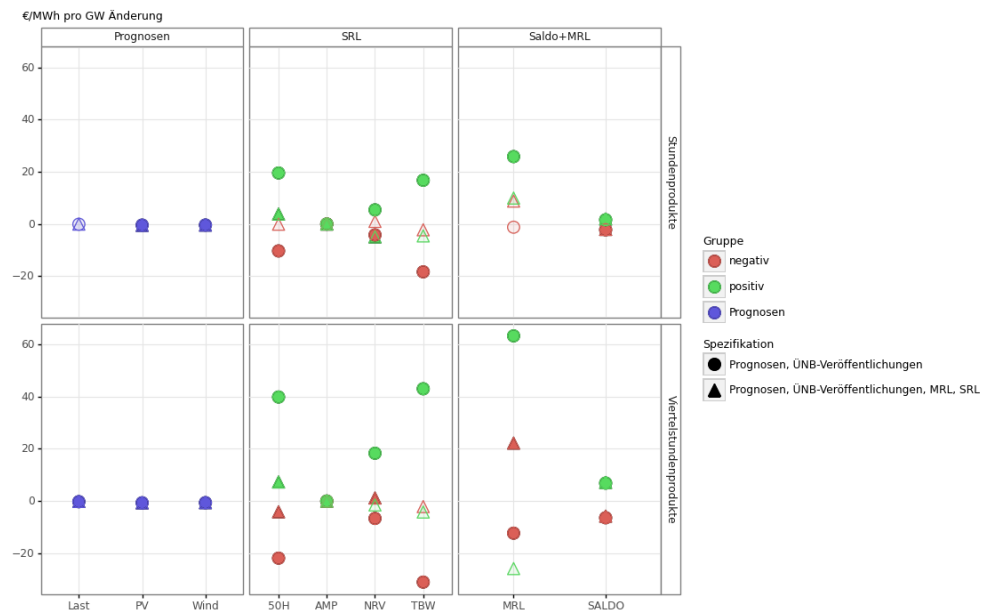


Abbildung 14. Koeffizienten der Kontrollvariablen in den Regressionen mit und ohne Regelleistungsabrufe. Nicht ausgefüllte Koeffizienten sind nicht signifikant auf dem 99%-Niveau.

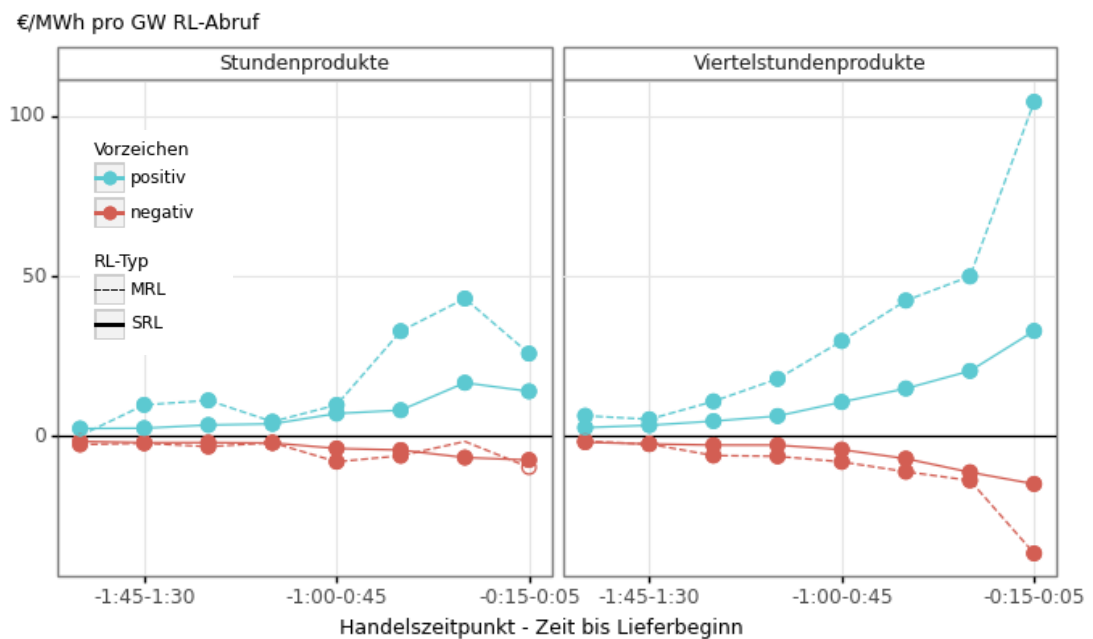


Abbildung 15. Die Effekte des SRL- und MRL-Abrufs auf den Intraday-Preis zu verschiedenen Handelszeitpunkten für Stunden- und Viertelstundenprodukte. (Wie Abbildung 7 inkl. Koeffizienten für MRL)

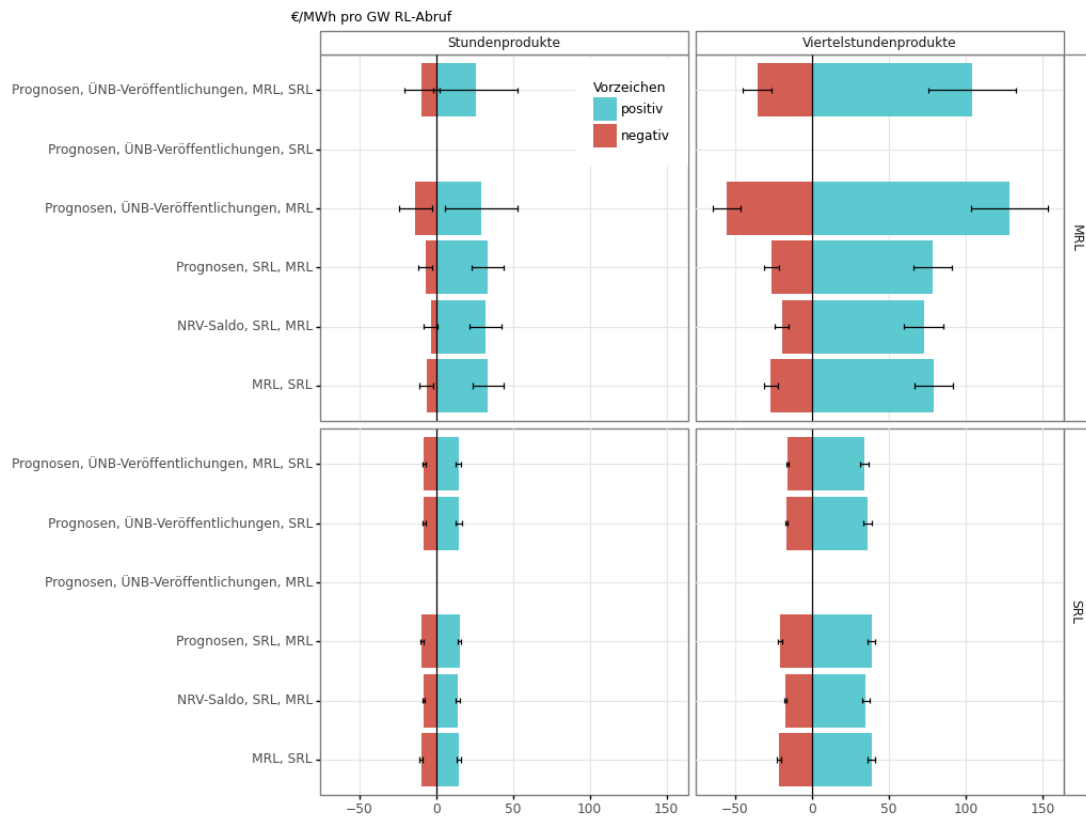


Abbildung 16. Effekt von Regelleistungs-Abruf auf den Intraday-Preis der Front-Produkte in verschiedenen Regressions-Spezifikationen. Der erste Balken aus jedem Panel entspricht Abbildung 6.

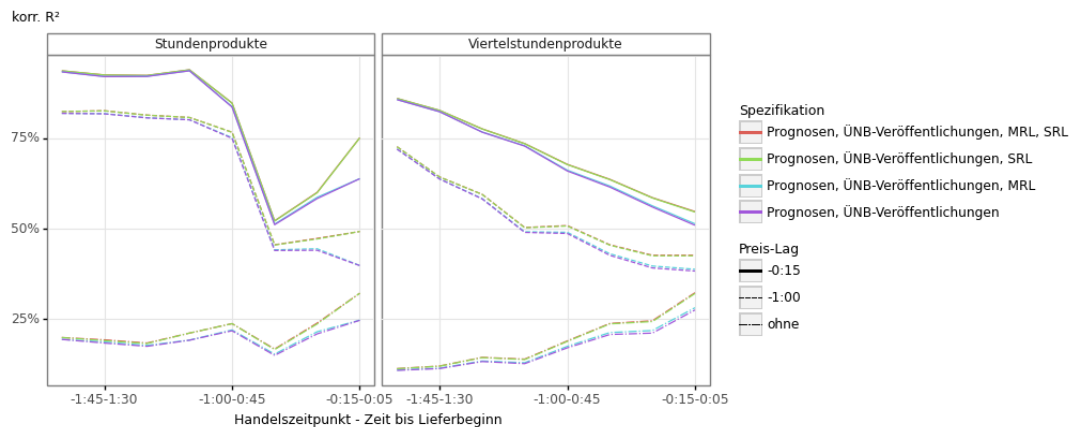


Abbildung 17. Korrigiertes R^2 bei Modellen mit und ohne zeitverzögertem Preis (Zeitverzug 15 oder 60 min) als Regressor und mit und ohne Regelleistungs-Abruf (SRL, MRL, beide) als Regressor.

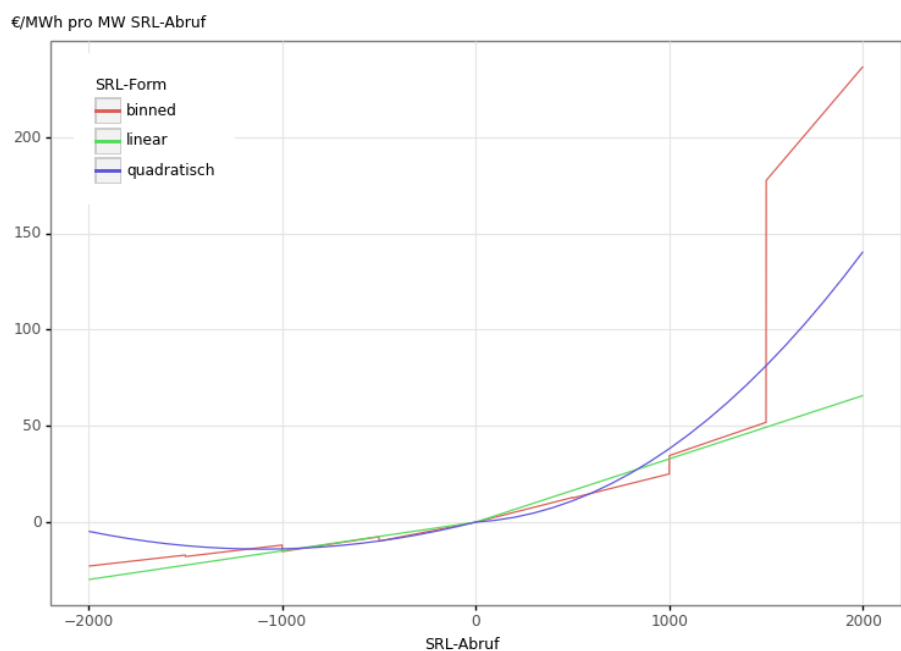


Abbildung 18. Alternative Implementierungen eines nicht-linearen Zusammenhangs zwischen Höhe des SRL-Abrufs und Preis: linearer, abschnittsweise linearer und quadratischer Zusammenhang.

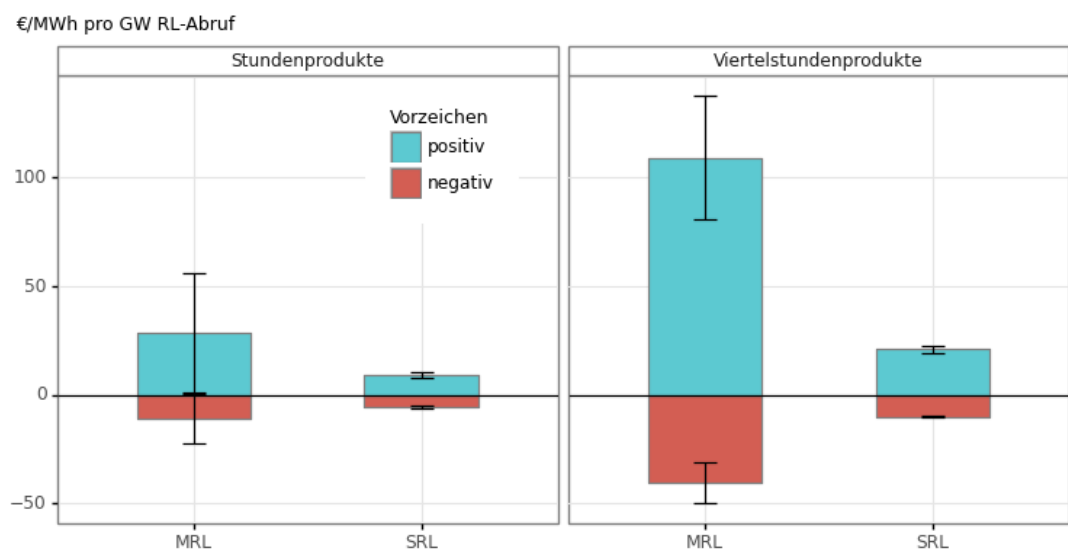


Abbildung 19. Effekt von Regelleistung-Abruf auf den Intraday-Preis der Front-Produkte bei 1-minütlicher Aggregation der SRL-Sollwerte.